

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)

13.04.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Проектирование и эксплуатация силовых установок для автомобилей специального

назначения

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Разработка системы выпуска двигателя КТМ 390 под регламент „Formula Student“»

Обучающийся

М.П. Гололобов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

канд. техн. наук А.С. Тизилев

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

Консультант

канд. филол. наук, доцент М.М. Бажутина

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

Тольятти 2025

Содержание

Введение	3
1 Состояние вопроса	6
1.1 Особенности проектирования выпускной системы гоночного болида по техническому регламенту соревнований Formula Student	6
1.2 Существующие конструкции и компоновки выпускных систем команд проекта Formula Student	10
2 Теоретические аспекты работы выпускных систем, имеющие влияние на работу ДВС	23
2.1 Анализ влияния общих параметров выпускной системы на внешние характеристики двигателя	23
2.2 Анализ влияния конструктива выпускной системы на внешние характеристики двигателя	36
3 Исследование влияния основных глушителей на характеристики выпускной системы.....	44
3.1 Понятие основного глушителя	44
3.2 Анализ влияния резонатора Гельмгольца на выпускную систему	46
4 Проектирование выпускной системы гоночного болида «Formula Student».....	51
4.1 Разработка 3D модели выпускной системы гоночного болида «Formula Student».....	51
4.2 Симуляция работы двигателя в программе Engine Analyzer Pro	54
Заключение.....	70
Список используемой литературы и используемых источников.....	71

Введение

Современные автомобили, создаваемые в условиях жесткой конкуренции, должны соответствовать высоким стандартам как по производительности, так и по требованиям к безопасности и экологии. В этом контексте выпускная система играет решающую роль, так как она отвечает за отвод выхлопных газов, минимизацию шумов и снижение токсичности выбросов. Эффективно спроектированная выпускная система не только улучшает работу двигателя, обеспечивая оптимальное сочетание мощности и экономичности, но и позволяет удовлетворить все современные экологические нормы.

Для разработки выпускной системы автомобиля требуется определение концепта самого автомобиля, которые характеризует базовые технические требования к самой выпускной системе, так как у каждого вида транспорта свои задачи: снижение уровня шума, минимализация количества выброса отработанных газов, максимальный коэффициент очистки отработанных газов из камеры сгорания. Все данные аспекты изучает студент ВУЗа за период своего обучения, чтобы обладать нужными компетенциями созданию нового изделия с требованиями к техническому заданию по разработке какой-либо выпускной системы автомобиля.

Проект «Formula Student» – это международный проект, который позволяет студентам применять усвоенные теоретические знания в учебных заведениях на практике с целью постройки гоночного болида. Проект построен на основе изучения современных методов подготовки инженерных кадров, а также специалистов по расчету стоимости производства готовой продукции. За время обучения, студент может спроектировать неоднократно гоночный болид и на выпуске из образовательного учреждения быть квалифицированным, опытным, легко обучаемым специалистом.

Целью проекта является изучения для студентов современных методов инжиниринга, способны к решению производственных задач с различными

техническими требованиями, которые будут актуальны в ближайшее время с перспективой на будущее.

Задачей студентов является создание гоночного болида, способный проехать гоночную трассу за минимальное количество времени с минимизацией затрат на производство, в рамках технического регламента международных соревнований «Formula Student».

Выпускная система должна обеспечивать автомобилю очищение камеры сгорания от отработанных газов, грамотная конструкция системы позволяет увеличивать коэффициент продувки камеры сгорания, что приводит к увеличению мощности двигателя внутреннего сгорания (ДВС), а также снижает шум работы ДВС. В случае недостаточной «продуваемости» выпускной системы, двигатель работает с пониженным КПД, что приводит к уменьшению мощности и ресурса.

Именно поэтому во время разработки гоночной выпускной системы требует предоставлять отдельное внимание на пропускную способность.

Итогом магистерской работы будет являться готовая 3D-модель выпускной системы, разработанная под регламент международных соревнований Formula Student для двигателя внутреннего сгорания от мотоцикла KTM 390. Разработка будет вести с помощью профессиональных программ по симуляции работы двигателя и симуляции потоков отработавших газов внутри выпускной системы последующей геометрической оптимизацией.

Цель данной работы: разработка выпускной системы гоночного болида класса «Formula Student» с учетом опыта конструкций прошлых болидов команды, а также анализом конструкций зарубежных команд в рамках технического регламента «Formula Student».

Задачи работы:

- изучение базовых теоретических знаний о проектировании, анализ теоретических факторов зависимости технических характеристик выпускной системы автомобиля;

- изучение регламента международных соревнований «Formula Student»;
- анализ конструкций выпускных системы российских и зарубежных команд «Formula Student»;
- обзор технических возможностей программ для симуляции работы ДВС «Engine Analyzer Pro» и «Solid Works Simulation».
- разработка выпускной системы;
- применение результатов исследования.

1 Состояние вопроса

1.1 Особенности проектирования выпускной системы гоночного болида по техническому регламенту соревнований Formula Student

Регламент международных соревнований «Formula Student» является основным документом, в котором написаны правила проведения соревнований для всех команд, а в том числе требования к разработке всех систем гоночного болида. Регламент соревнований «Формула Студент» представляет собой набор правил и требований, которые определяют условия участия команд, занимающихся проектированием и строительством малых гоночных автомобилей. Этот документ является основой для обеспечения безопасности, честности и технической целостности соревнований. Он необходим для защиты участников, зрителей и окружающей среды, так как включает в себя требования, направленные на безопасность всех вовлеченных.

Именно в регламенте прописаны требования абсолютно 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 подходов, позволяя командам сосредоточиться на проектировании и оптимизации своих автомобилей.

Болид должен соответствовать техническому регламенту соревнований, описанных в разделе «Т» (GENERAL TECHNICAL REQUIREMENTS), в случае несоблюдения своду правил команда будет снята с участия в соревнованиях.

Соревнования начинаются с технической проверки болида на соответствие регламенту, а также судейская комиссия имеет право проверить болид на соответствие регламенту после завершения динамических дисциплин, если болид имеет отклонения от требований соревнований –

результаты динамической дисциплины аннулируются. Технический регламент разработан по принципу «главное – безопасность», поэтому если во время динамической дисциплины какой-либо узел или деталь проявили недостаточную надежность – результаты аннулируются, из-за этого во время разработки гоночного болида и его компонентов требуется закладывать достаточный коэффициент надежности.

На 2025 год действующим документом соревнований является FS Rules 2025, разработанный специально для проведения соревнований FS Germany и является эталонным документом для остальных соревнований Formula Student. Документ обновляется ежегодно, добавляя различные нововведения или исправляя неточности прошлого издания. В разделе «Т» и «CV» (INTERNAL COMBUSTION ENGINE VEHICLES) описаны основные технические ограничения по разработке выпускной системы гоночного болида.

В разделе CV 3 «Exhaust system and noise control» описаны основные технические требования к выпускной системе болида класса Formula Student.

CV3.1.1 уведомляет, что выхлопное отверстие выпускной системы не должно быть направлено в сторону пилота, а выпускаемый поток отработавших газов не должен доставать до пилота на любой скорости.

«CV3.1.2 выпускное отверстие не должно выступать более чем на 450 мм за центральную линию задней оси и должно находиться на высоте не более 600 мм над землей.

CV3.1.3 Все компоненты выпускной системы сбоку пространственной рамы перед задней осью болида должны быть изолированы от прямого касания человека. Температура внешней поверхности компонентов не должна быть вредной для человека, прикасающегося к ней.

CV3.1.4 Запрещается наносить волокнистый/абсорбирующий материал на внешнюю поверхность выпускного коллектора или выхлопной системы» [25] по причине большого количества выделяемых веществ вредных для организма человека.

«Также регламентом соревнований предусмотрены пункты, ограничивающие шум и вибрационный шум выпускной системы при работе силового агрегата: пункт 3.2.1 Максимальная тестовая скорость для двигателя соответствует средней скорости поршня в диапазоне 15–25 м/с. Окончательная скорость округляется до ближайшего значения, кратного 500 оборотам в минуту. На основании этих расчетов максимальный уровень шума не должен превышать 110 дБ» [8].

«Пункт 3.2.2 Команда самостоятельно выбирает тестовый холостой ход для своего двигателя. Холостой ход определяется на основе их откалиброванного значения. Если частота вращения на холостом ходу изменяется, автомобиль будет протестирован на различных оборотах, установленных командой. Максимально допустимый уровень шума на холостом ходу не должен превышать 103 дБ.

Требования к уровню шума гоночного автомобиля измеряются с помощью специального оборудования. На соревнованиях «Формула Студент» есть специализированный участок для того, чтобы провести проверку на шум, которая является частью технической инспекции автомобиля. Инспекторы также имеют право в любой момент попросить команду пройти в зону технической проверки для повторной оценки системы выхлопа и измерения уровня шума» [11].

Кроме того, разделы регламента, которые касаются системы выпуска газов гоночного болида, включают в себя следующее: пункт 1.3.1 Все компоненты управления впуском и выпуском воздуха должны находиться внутри объема, который располагается под дугой, огибающей колеса и главную дугу. Контур, в котором размещается впускная и выпускная система, показан на рисунке 1.

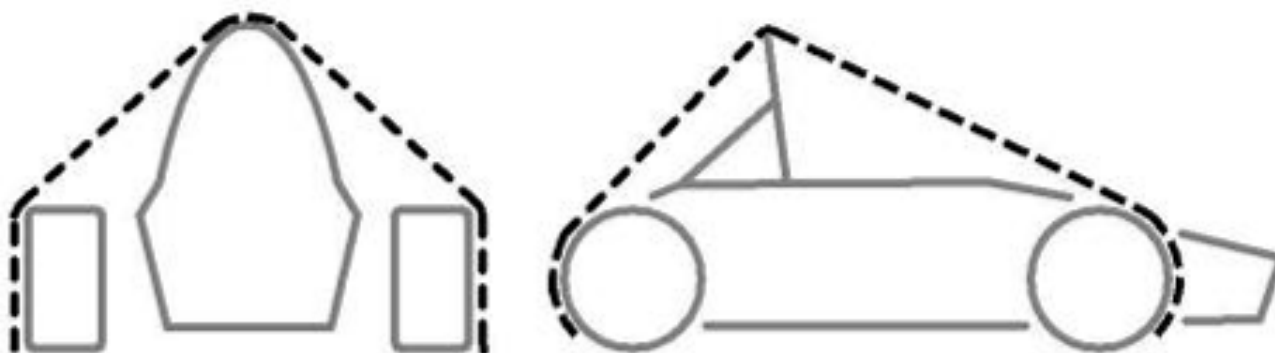


Рисунок 1 – Контур, в котором размещается впускная и выпускная система, гоночного болида

«Пункт 2.1.3 Запрещается, чтобы какие-либо элементы автомобиля находились в свободной зоне, которая определяется двумя вертикальными линиями, расположенными на расстоянии 75 мм от передней части автомобиля и 75 мм от внешнего диаметра передних и задних колес. При этом колеса должны быть установлены в прямом положении. Эта зона будет простирается от внешней грани колеса/шины до внутренней грани» [20].

Все перечисленные выше пункты регламента соревнований «Формула Студент» очень строго контролируются организаторами во время проведения технической инспекции автомобиля [28]. В случае если хотя бы один пункт нарушен для любой из систем автомобиля, в том числе системы впуска или выпуска, вероятны несколько вариантов развития событий:

- за серьезное нарушение команда дисквалифицируется;
- назначается штраф, который отнимает у команды финальные баллы, а размер штрафа может быть определен только организаторами;
- за время, пока проводится техническая инспекция, если команда успевает вовремя внести изменения в конструкцию, которая удовлетворит

инспекторов во время повторной инспекции, то у команды есть шанс пройти к динамическим дисциплинам без потери баллов.

1.2 Существующие конструкции и компоновки выпускных систем команд проекта Formula Student

«Соревнования «Формула Студент» уже более тридцати лет привлекают внимание студентов со всего мира, вдохновляя их на создание уникальных гоночных автомобилей. За это время было разработано множество болидов, которые с каждым годом становятся все более технологичными и сложными. Эволюция регламента соревнований также сыграла свою роль, вводя новые требования ко всем системам автомобилей, включая выпускные системы.

Чтобы спроектировать эффективную выпускную систему для болида «Формула Студент», необходимо не только освоить теоретические аспекты работы двигателей внутреннего сгорания и выпускных систем, но и провести глубокий анализ существующих решений, наблюдая за их функционированием на трассе. Исследовательская работа, в рамках которой будут изучены различные конструкции выпускных систем гоночных автомобилей, позволит выявить как недостатки, так и преимущества зарубежных команд, а также извлечь уроки из их опыта, чтобы избежать повторения ошибок.

В данном сравнительном анализе будут рассмотрены несколько гоночных автомобилей класса «Формула Студент», созданных зарубежными студенческими командами, которые успешно прошли этапы соревнований.

Оценка различных конструкций выпускной системы будет проводиться по следующим критериям:

- насколько болид соответствует требованиям тех. инспекции;
- используемая схема выпускной системы;
- насколько данная схема эффективна.

На рисунке 2 можно увидеть первый гоночный болид австралийской команды «Формула Студент» [12].



Рисунок 2 – Гоночный болид австралийской команды «Формула Студент»

«Команда использует четырехцилиндровый двигатель внутреннего сгорания и выбрала схему импульсной выпускной системы 4–1 для своего гоночного автомобиля, установив при этом достаточно длинные первичные трубопроводы. Это решение может положительно сказаться на процессе очистки камеры сгорания от отработанных газов, что способствует поступлению свежего заряда во время впуска.

Однако стоит отметить, что выхлопная труба направлена в сторону колеса, что может негативно повлиять на управляемость автомобиля из-за температурной разницы между правой и левой шинами.

Что касается впускной системы, то можно увидеть, что команда использует ресивер овальной формы, изготовленный из стекловолокна с

боковым забором воздуха в систему. Из недостатков можно сказать, что ресивер такой формы может мешать потокам воздуха беспрепятственно попадать в камеру сгорания. Также хочется отметить, что раннер ресивера достаточно короткий, что приведет к снижению мощности» [1].

Команда Monash Motorsport является одной из сильнейших команд Formula Student и возглавляет мировой рейтинг на 2019-2020 год. Данная команда предоставляет информацию о своих исследованиях в открытом доступе, одно из них – разработка выпускной системы для ДВС с одним цилиндром.

На рисунках 3 и 4 представлен вид выпускной системы команды Monash Motorsport, видны достоинства и недостатки такого конструктива.

В качестве достоинства можно отменить ремонтпригодность выпускной системы, которая может возникнуть при сбое датчиков двигателя, отвечающих за количество подачи топлива в камеру сгорания, что приведет к разрушению глушителя выпускной системы.

Из недостатков можно выделить, что часть выпускного коллектора выходит за пределы пространственной рамы, что не соответствует действующему регламенту соревнований пункту CV 3.1.3. Из особенностей конструкции можно отметить конечную насадку выхлопной системы, которая направлена вертикально вверх, что позволяет снизить показываемые цифры dB на измерительном приборе «шумометр» из-за отсутствия «жестких стенок», как асфальт, которые резонируют вредоносные волны.

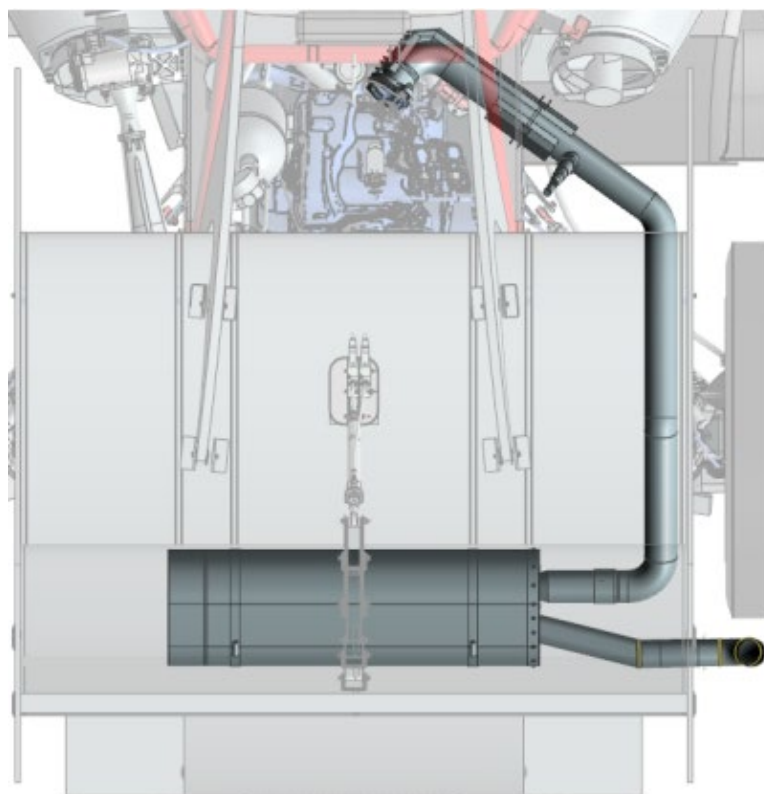


Рисунок 3 – Выпускная система команды Monash Motorsport. Вид сверху

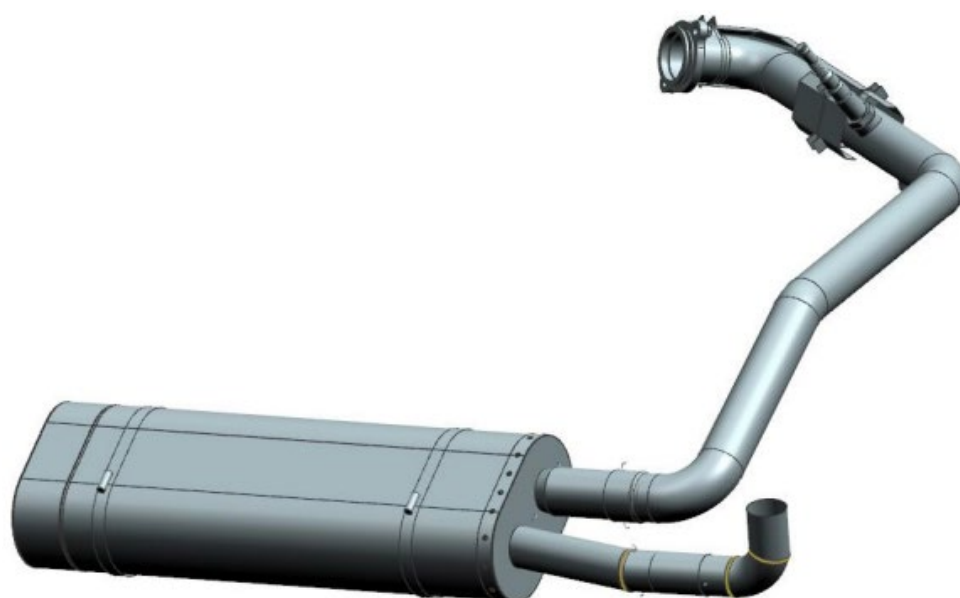


Рисунок 4 – Выпускная система команды Monash Motorsport.
Изометрический вид

Внутреннее устройство глушителя представлено на рисунке 5. Конструкция глушителя включает два объема. Первый объем предназначен для подавления резонансных частот с использованием перфорированных труб, покрытых специальной термостойкой ватой. Такая конструкция позволяет эффективно гасить звуковые колебания и частично абсорбировать остаточные токсичные компоненты выхлопных газов.

Второй объем представляет собой камеру дополнительного шумоподавления, активную преимущественно в условиях резкого открытия дроссельной заслонки, при переключении передач и в момент ее резкого закрытия. В этот момент поток отработанных газов отражается от специальных рефлексивных перегородок внутри камеры, что предотвращает обратный ток выхлопных газов в сторону камеры сгорания. При отсутствии этой функции возможно повышение давления на поршень, что, в свою очередь, приводит к снижению частоты вращения коленчатого вала и нестабильным показаниям датчика кислорода из-за неправильного считывания объема несгоревшего топлива. Такие условия могут вызывать кратковременную нестабильную работу двигателя внутреннего сгорания.

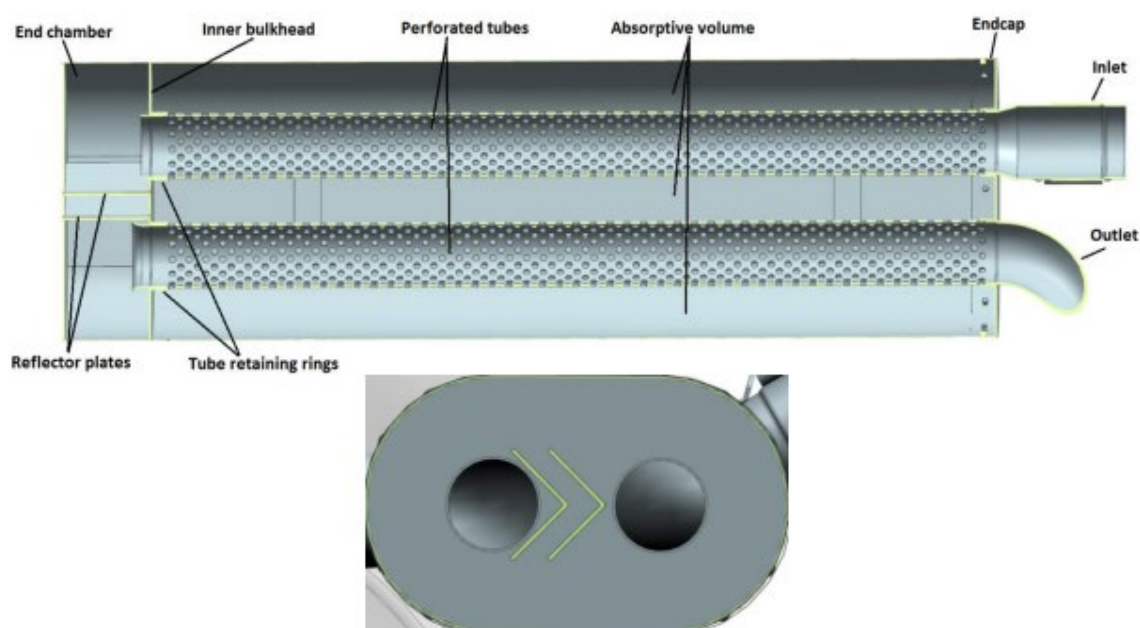


Рисунок 5 – Внутренний конструктив глушителя команды Monash Motorsport

Далее, на рисунке 6 рассмотрим конструкцию выпускной системы австрийской команды «Формула Студент».



Рисунок 6 – Гоночный болид австрийской команды «Формула Студент»

«На изображении видно, что эта команда также применяет четырехцилиндровый двигатель внутреннего сгорания в сочетании с выпускной системой 4–1.

В данном случае можно выделить два ключевых отличия: во-первых, у них более длинные первичные трубопроводы, что способствует повышению эффективности работы мотора на низких оборотах, но при этом снижает его производительность на высоких.

Во-вторых, стоит отметить, что выпускная система выходит за пределы пространственной рамной конструкции, что создает риск контакта человека с горячими элементами системы. Это противоречит регламенту соревнований, и

за подобное нарушение команда может быть исключена из участия в динамических дисциплинах.

Впускная система данной команды изготовлена из пластика на 3Д-принтере и имеет круглую форму, а также боковой забор воздуха. Круглая форма ресивера благоприятно сказывается на доставке воздуха в камеру сгорания, однако изготавливать такой ответственный элемент на 3Д-принтере не очень хорошая идея.

Во-первых, детали, изготовленные на 3Д-принтере, имеют большое количество щелей, которые могут пропускать воздух, а также это довольно непрочная конструкция.

Кроме того, одна из задач ресивера – обеспечить ламинарный поток воздуха, однако ресивер, изготовленный на 3Д-принтере, имеет сильную шероховатость на внутренней поверхности, что неблагоприятно будет влиять на поступления воздуха в камеру сгорания» [27].

«Далее рассмотрим одну из немецких команд «Формула Студент». Рендер впускной и выпускной систем гоночного болида данной команды изображены на рисунке 7.

На рисунке представлено, что команда использует четырехцилиндровый двигатель внутреннего сгорания в комбинации со схемой 4-2-1, что является довольно распространенной практикой для автомобилей этого класса» [21].

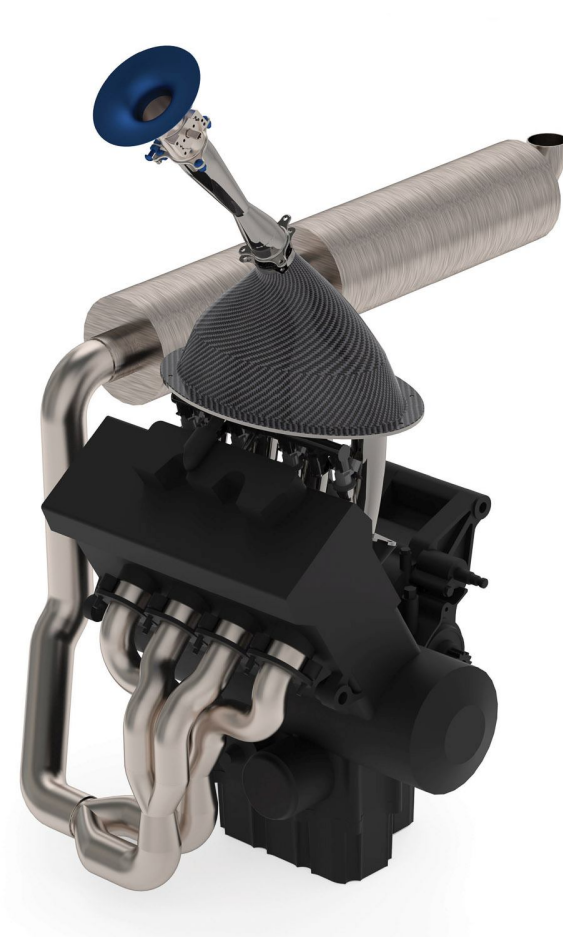


Рисунок 7 – Впускная и выпускная система немецкой команды «Формула Студент»

«Изображение демонстрирует достаточно длинный вторичный трубопровод, который ведет к глушителю, что указывает на то, что команда сосредоточилась на повышении эффективности двигателя на высоких оборотах. Также заметно, что глушитель на этом гоночном автомобиле имеет значительные размеры, что, вероятно, свидетельствует о проблемах с шумом, и для их устранения команде пришлось принять такое решение.

Одним из недостатков данной конструкции является то, что горячие элементы выхлопной системы находятся в зоне доступа, что создает риск серьезных ожогов для людей, находящихся рядом с автомобилем. Это противоречит регламенту соревнований, и, скорее всего, команда не сможет участвовать в динамических дисциплинах» [16].

Что касается впускной системы, то это ресивер, изготовленный наполовину из углеродного волокна для снижения веса, а вторая половина изготовлена из стальной конструкции, что в свою очередь приведет к увеличению веса.

Забор воздуха осуществляется сверху, что скорее всего не очень хорошо, потому что обычно основной поток воздуха проходит над автомобилем. Форма ресивера выглядит неправильной, потому что потоки воздуха проходя к нижней части ресивера сталкиваются в плоскую стенку, за счет чего потоки воздуха в ресивере могут сталкиваться между собой» [15].

Далее рассмотрим еще один гоночный болид одной из эстонских команд класса «Формула Студент», увидеть его можно на рисунке 8.



Рисунок 8 – Гоночный болид эстонской команды класса «Формула Студент»

«На рисунке представлено, что команда использует одноцилиндровый двигатель внутреннего сгорания на своем гоночном автомобиле класса «Формула Студент», применяя схему 1–1.

Стоит отметить, что одноцилиндровые двигатели, как правило, обладают высокой оборотистостью и часто работают на высоких оборотах. Поэтому сокращение длины первичной трубы, ведущей к глушителю выпускной

системы, вероятно, было обоснованным решением, так как это способствует увеличению мощности двигателя» [9].

Однако следует обратить внимание на то, что горячие элементы выхлопной системы находятся в зоне доступа, что создает риск серьезных ожогов для людей, находящихся рядом с автомобилем.

Впускная система изготовлена из углеродного волокна и имеет продолговатую форму. Можно увидеть также, что команда увеличила длину раннера за счет чего команда, по всей видимости, предпринимала попытку повысить мощность. Забор воздуха осуществляется сверху, что скорее всего не очень хорошо, поскольку обычно основной поток воздуха проходит над автомобилем.

Далее рассмотрим гоночный болид класса «Формула Студент» другой перспективной команды из Германии на рисунке 9.



Рисунок 9 – Гоночный болид немецкой команды класса «Формула Студент»

«На рисунке представлена информация о том, что команда использует четырехцилиндровый двигатель внутреннего сгорания в своем гоночном автомобиле класса «Формула Студент». Здесь можно заметить, что они применили нестандартную для этого класса схему 4–2–1. Судя по общей компоновке, выбор данной схемы был обусловлен конструктивными соображениями. Команда сократила длину первичных трубопроводов выхлопной системы и сделала акцент на работу двигателя на низких оборотах. В этой схеме четыре трубы объединяются в две, а затем снова соединяются в одну перед глушителем.

Среди положительных аспектов стоит отметить, что глушитель частично изготовлен из карбонового волокна, что позволяет уменьшить общую массу системы и снижает риск повреждений, таких как прогары или трещины, вызванные термическими или агрессивными воздействиями окружающей среды. Также следует подчеркнуть, что все горячие элементы выхлопной системы защищены и скрыты от доступа, благодаря боковым аэродинамическим обвесам автомобиля.

Тем не менее, есть одно замечание по поводу данной компоновки. При выходе из пространственной рамной конструкции в сторону глушителя трубные элементы были загнуты почти под 90 градусов, что может привести к частичному возврату выхлопных газов и возникновению резонансных колебаний. Это, в свою очередь, может увеличить уровень шума и вибраций» [10].

Команды Formula Student используют различные ДВС от мотоциклов с количеством цилиндров от одного до четырех, что привносит разнообразие конструкций выпускных систем.

Немецкая команда T.U. Berlin (рисунок 10) решила использовать стандартный выпускной коллектор от своего двигателя КТМ 450, с последующим соединением оригинального глушителя. Достоинством стандартных выпускных коллекторов от мотоциклов имеет их габаритные размеры, что позволяет более компактно разместить все компоненты,

находящиеся вокруг выпускной системы, а также минимизация затрат на изготовление оригинальных деталей с последующей возможностью приобрести данную деталь как запасную.



Рисунок 10 – Выпускная система немецкой команды T.U. Berlin

Для снижения звукового шума команда решила выполнить конец глушителя, для отвода выхлопных газов в атмосферу, с минимальным проходным сечением, для максимального снижения шумов в низком частотном диапазоне. К не большие потери скорости вращения коленчатого вала из-за высокого противодавления, возникающего в глушителе.

Команда Bauman Racing Team (рисунок 11) использует оригинальную конструкцию выпускной системы. Достоинством является короткий выпускной коллектор, «позволяющий снизить общую массу выпускной системы, а также увеличить отдачу КПД ДВС на высоких скоростях вращения коленчатого вала. Недостатком конструкции Московской команды – высокий риск вредоносного контакта рычагов подвески с глушителем выпускной

системы» [13], что приведет к деформации корпуса глушителя с последующим его разрушением.



Рисунок 11 – Гоночный болид команды Bauman Racing Team

Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены пункты регламента международных соревнований «Formula Student» в разделе выпускных систем. Проведен анализ существующих конструкций выпускных систем европейских команд, а также российской с последующими выводами их достоинств и недостатков. Оценка анализа показала большое количество видов существующих конструкций, на основе которых можно разработать оригинальную конструкцию.

2 Теоретические аспекты работы выпускных систем, имеющие влияние на работу ДВС

2.1 Анализ влияния общих параметров выпускной системы на внешние характеристики двигателя

«Выпускная система автомобиля играет ключевую роль в его работе, обеспечивая эффективное удаление отработанных газов из двигателя. Она не только способствует улучшению производительности автомобиля, но и влияет на его экологические характеристики и уровень шума.

Основная функция выпускной системы заключается в отводе отработанных газов, образующихся в процессе сгорания топлива в цилиндрах двигателя. Это позволяет поддерживать оптимальное давление в камерах сгорания, что, в свою очередь, способствует более эффективной работе двигателя. Кроме того, правильно сконструированная выпускная система помогает снизить уровень шума и уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу.

Выпускная система автомобиля состоит из нескольких ключевых компонентов:

- выпускной коллектор – собирает отработанные газы из цилиндров и направляет их в трубу;
- катализатор – отвечает за химическую обработку отработанных газов, уменьшая содержание вредных веществ;
- глушитель – снижает уровень шума, создаваемого при выходе газов из системы;
- выпускная труба – выводит очищенные газы в атмосферу.

Работа выпускной системы начинается с того, что отработанные газы, образующиеся в результате сгорания топлива, поступают в выпускной коллектор» [2]. Оттуда они направляются к катализатору, где происходит химическая реакция, уменьшающая количество токсичных веществ. После

этого газы проходят через глушитель, который снижает уровень шума, и, наконец, выходят через выпускную трубу.

Существует несколько типов выпускных систем, каждая из которых имеет свои особенности и предназначение.

Стандартная выпускная система – предназначена для обеспечения нормального функционирования автомобиля, соблюдая требования по шуму и выбросам.

«Спортивная выпускная система – разработана для повышения производительности и звука автомобиля. Она часто имеет меньшие ограничения на поток газов, что позволяет двигателю работать более эффективно.

Двойная выпускная система – включает два отдельных выхода для отработанных газов, что может улучшить производительность и звук, а также обеспечить более равномерное распределение газов.

Выпускная система с переменной геометрией – использует механизмы, которые изменяют форму или размер системы в зависимости от условий работы двигателя, что позволяет оптимизировать производительность на разных оборотах.

Основные отличия между типами выпускных систем заключаются в их конструкции, предназначении и влиянии на характеристики автомобиля. Стандартные системы ориентированы на соблюдение норм, в то время как спортивные системы нацелены на максимизацию производительности и улучшение звука. Двойные системы обеспечивают более эффективный отвод газов, а системы с переменной геометрией предлагают гибкость в управлении потоком газов, что может значительно улучшить динамические характеристики автомобиля» [7].

Таким образом, выпускная система является важным элементом автомобиля, который влияет на его производительность, уровень шума и экологические показатели. Правильный выбор и настройка выпускной системы могут существенно улучшить характеристики транспортного

средства. На рисунке 12 показана стандартная схема того, как выпускная система обычно устанавливается на серийных автомобилях.

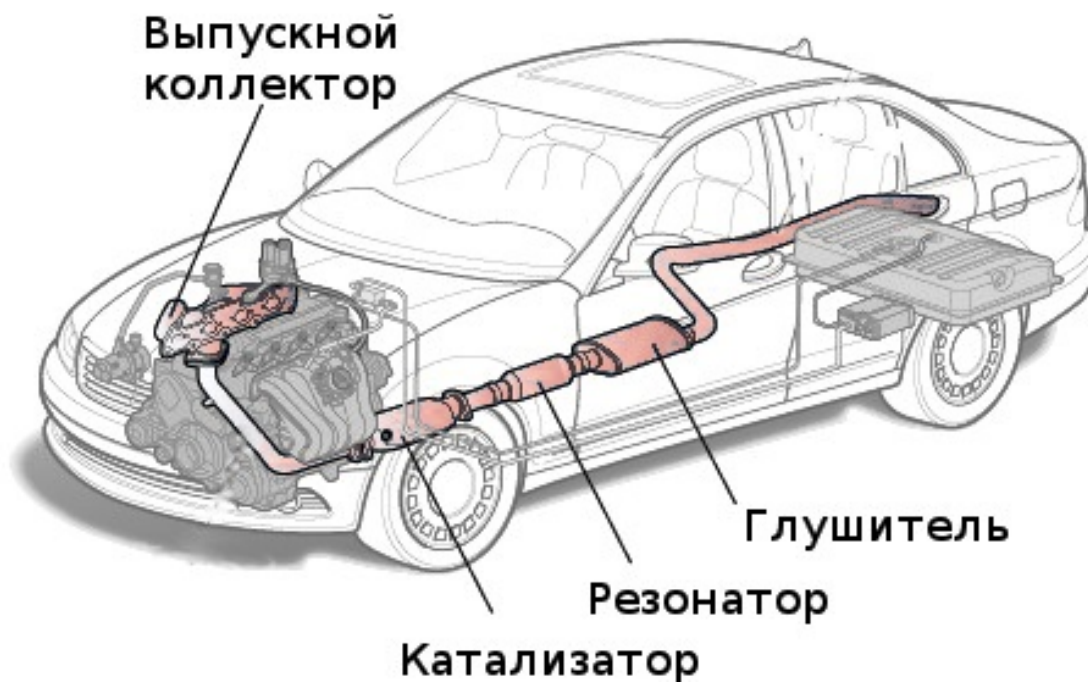


Рисунок 12 – Стандартная выпускная система

«В большинстве двигателей внутреннего сгорания выпускной коллектор располагается на головке блока цилиндров. Через его каналы отработанные газы направляются в катализатор. Выпускной коллектор играет важную роль в мощностных характеристиках гоночных автомобилей, так как он влияет на эффективность сгорания топлива и его расход.

Этот компонент подвергается высоким температурам, поскольку находится в непосредственной близости к камере сгорания, что делает его уязвимым к термической усталости. Поэтому для его изготовления обычно используют термостойкие материалы. Наиболее распространены нержавеющая сталь и сталь с антикоррозионным покрытием, так как выпускной коллектор также подвержен воздействию внешних факторов, таких как окисление, абразивные частицы с дороги и реагенты, используемые для

борьбы с гололедом. Важно, чтобы не только выпускные коллекторы, но и другие элементы системы обладали термостойкостью и защитой от коррозии, чтобы избежать их преждевременного выхода из строя. Частыми проблемами являются трещины и коррозия, которые могут привести к серьезным последствиям. Особенно опасны трещины или прогоревшие прокладки между головкой блока цилиндров и впускным коллектором, так как выхлопные газы токсичны и могут попасть в салон автомобиля, что представляет угрозу для здоровья пассажиров.

Инженеры стремятся оптимизировать конструкцию элементов выпускной системы так, чтобы во время такта выпуска максимально эффективно удалялись отработанные газы. Это необходимо для того, чтобы следующий заряд топливно-воздушной смеси был чистым и легко воспламенялся. Хотя некоторые компоненты, такие как резонатор и катализатор, могут препятствовать полному удалению газов, их нельзя исключить из серийных автомобилей из-за строгих норм по экологии и шуму. В отличие от серийных моделей, гоночные автомобили могут отказаться от некоторых элементов системы, что позволяет значительно повысить эффективность и мощность болидов» [17].

Импульсные выпускные системы представляют собой инновационное решение в области автомобильной инженерии, направленное на оптимизацию работы двигателя и повышение его производительности. Основная особенность таких систем заключается в том, что они используют принцип 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 распространенными являются конфигурации 4-2-1 и 4-1.

В конфигурации 4-2-1 четыре цилиндра двигателя разделяются на две группы по два цилиндра, которые затем соединяются в один общий коллектор. Такой подход позволяет создать два резонансных эффекта, что улучшает отвод

газов на средних оборотах и способствует более равномерному распределению давления в системе. Это особенно полезно для двигателей, работающих в широком диапазоне оборотов, так как обеспечивает оптимальную производительность на различных режимах.

В конструкции 4–1 все четыре цилиндра соединяются в один общий коллектор. Это позволяет достичь максимального эффекта резонанса на высоких оборотах, что делает такую систему идеальной для спортивных автомобилей и гоночных болидов. Система 4–1 способствует более быстрому удалению отработанных газов, что увеличивает мощность и отклик двигателя на педаль акселератора [4].

Импульсные выпускные системы не только улучшают производительность двигателя, но и могут способствовать снижению уровня шума и вибраций, что делает их привлекательными для использования как в спортивных, так и в серийных автомобилях. Благодаря своей конструкции они позволяют добиться оптимального баланса между мощностью, экономичностью и комфортом вождения.

На рисунках 13 и 14 можно увидеть выпускные системы, разработанные по схемам 4–2–1 и 4–1.

«Правильный выбор длины трубопроводов в выпускной системе играет ключевую роль в оптимизации работы двигателя. Это позволяет регулировать коэффициент наполнения цилиндров» [23] в зависимости от частоты вращения коленчатого вала.



Рисунок 13 – Выпускная система типа 4-2-1



Рисунок 14 – Выпускная система типа 4–1

Особенно значительное влияние на эффективность очистки камеры сгорания оказывают первичные трубопроводы, длина которых критически важна для достижения максимальной производительности.

Выпускная система автомобиля играет важную роль в его динамических характеристиках и общей производительности. Это связано с множеством факторов, включая архитектуру системы, конструкцию глушителей, катализаторов, а также использование различных материалов. Давайте

рассмотрим влияние общих параметров выпускной системы на динамические характеристики автомобиля более детально.

Во-первых, одним из ключевых параметров является диаметр выпускного коллектора и трубопроводов. Увеличение диаметра может снизить сопротивление потоку отработанных газов, что, в свою очередь, может привести к повышению мощности двигателя, особенно на высоких оборотах. Однако слишком большой диаметр также может негативно сказаться на малых скоростях вращения коленчатого вала, уменьшая крутящий момент, что делает автомобиль менее отзывчивым на низких передачах. Оптимальный диаметр должен быть тщательно подобран в зависимости от типа двигателя и его характеристик [30].

Во-вторых, конструкция глушителей также существенна. Глушители предназначены для снижения уровня шума и могут влиять на динамику болида. Например, спортивные глушители, которые имеют менее сложные каналы для отработанных газов, могут способствовать увеличению мощности и улучшению звука работы двигателя. Они, как правило, предлагаются с меньшим сопротивлением и могут обеспечивать более высокий уровень производительности, но могут также привести к увеличению уровня шума, что может быть нежелательно для некоторых водителей [29].

Важно также рассмотреть материалы, из которых изготовлена выпускная система. Использование легких и прочных сплавов, таких как нержавеющая сталь или титановый сплав, может снизить общий вес автомобиля и улучшить его динамические характеристики. Более легкая система уменьшает инерцию, позволяя автомобилю быстрее реагировать на команды водителя и повышая общую маневренность.

Наконец, необходимо учитывать взаимосвязь выпускной системы с другими компонентами автомобиля, такими как впускная система и трансмиссия. Например, оптимизированная выпускная система должна работать в тандеме с высокопроизводительной впускной системой, чтобы обеспечить лучший общий приток и отток воздуха, что позволит поступать

большому количеству свежему заряду в камеру сгорания, что особенно важно для мощных двигателей.

Вышеперечисленные факторы можно перевести в КПД выпускной системы через вычисления противодействия в выпускной системе. Противодействие – это давление, возникающая в выпускной системе и оказывающая сопротивление на возвратно-поступающее движения шатунно-поршневой группы двигателя. Малое сечение выпускной трубы уменьшает dВ звукового шума, воспроизводимым работы двигателем, из-за более раннего затухания амплитуды резонанса, однако возникает дополнительное противодействие, что негативно сказывается на КПД двигателя.

На рисунке 15 схематично показано явление резонанса в выпускной трубе двигателя, также проведение симуляций с одинаковыми входными данными для расчета, но с разным внутренним диаметром проявится разное противодействие.

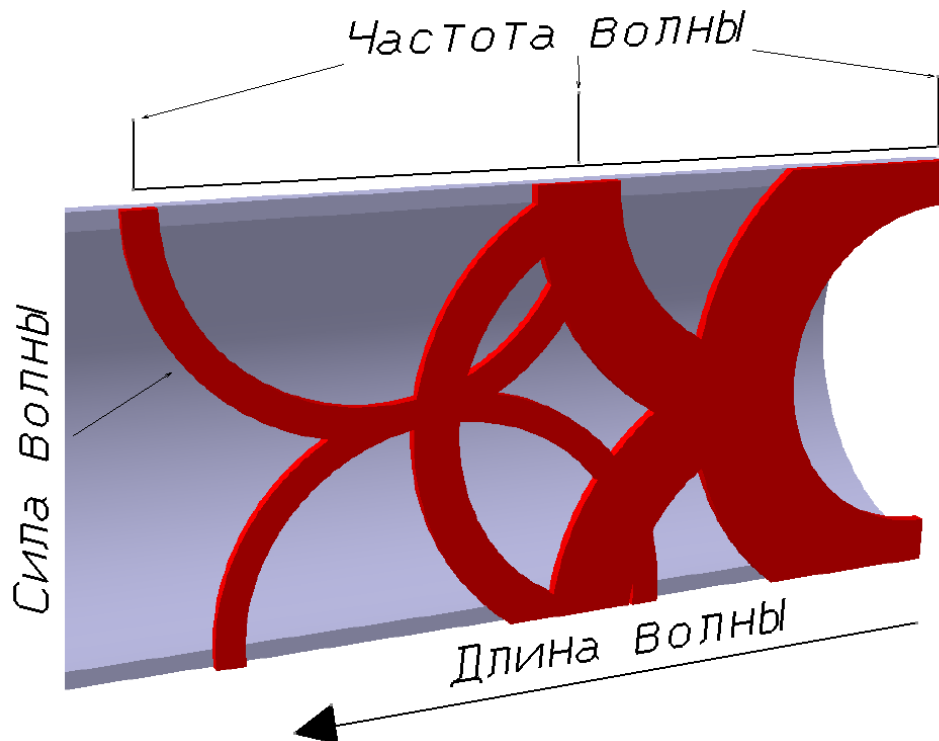


Рисунок 15 – Резонанс в выпускной трубе двигателя

На рисунках 16 и 17 показана симуляция продувки трубы на массовый расход воздуха. Как выясняется, чем больше «диаметр выпускной трубы, тем меньше противодействие оказывает выпускная система на ДВС. Однако большого внутреннего диаметра трубы дает низкочастотный резонанс, дающий низкий громкий бас, который может при повышении увеличение скорости потока отработавших газов в трубе» [14], во время открытия дроссельной заслонки, среднечастотную звуковую волну с большой амплитудой, то есть в высокие dB.

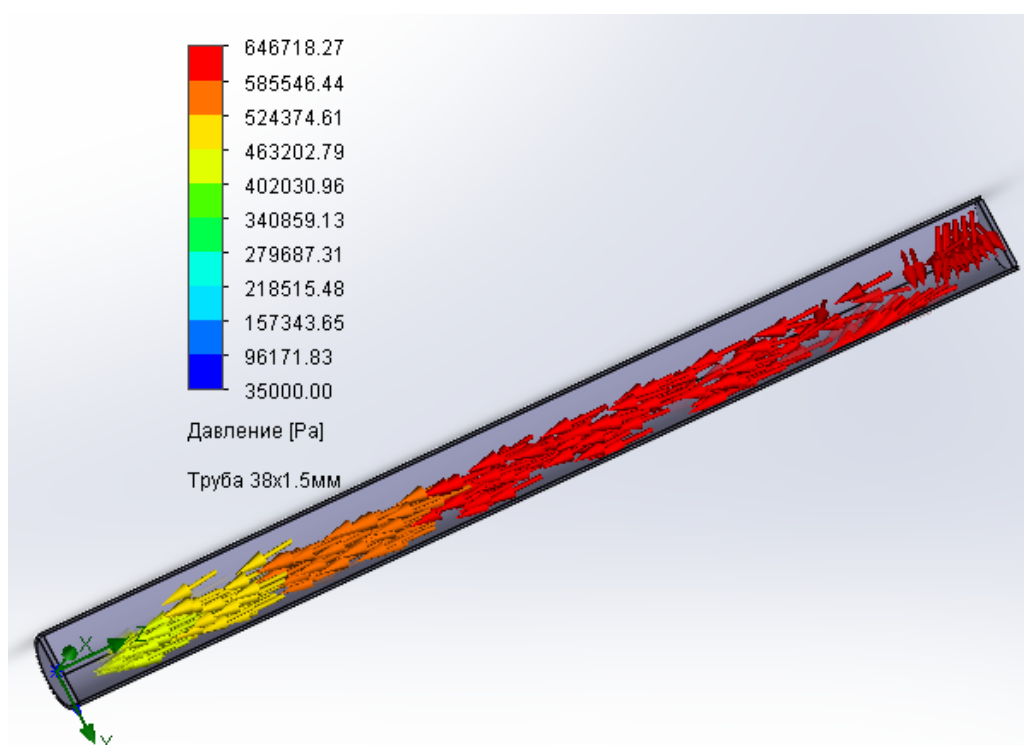


Рисунок 16 – Симуляция давления в трубе 38x1,5 мм

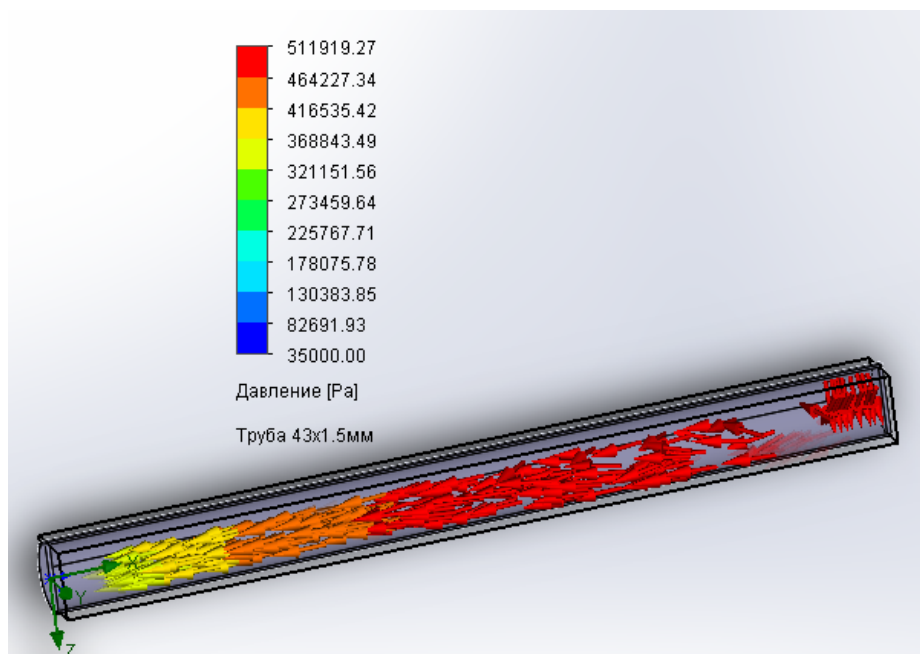


Рисунок 17 – Симуляция давления в трубе 43x1.5 мм

На рисунке 18 схематично представлена визуализация в частотных графиках перехода из громкого низкого баса гул. Сравнение графиков дает возможность понять разницу в амплитуде волны, означающее звуковое давление.

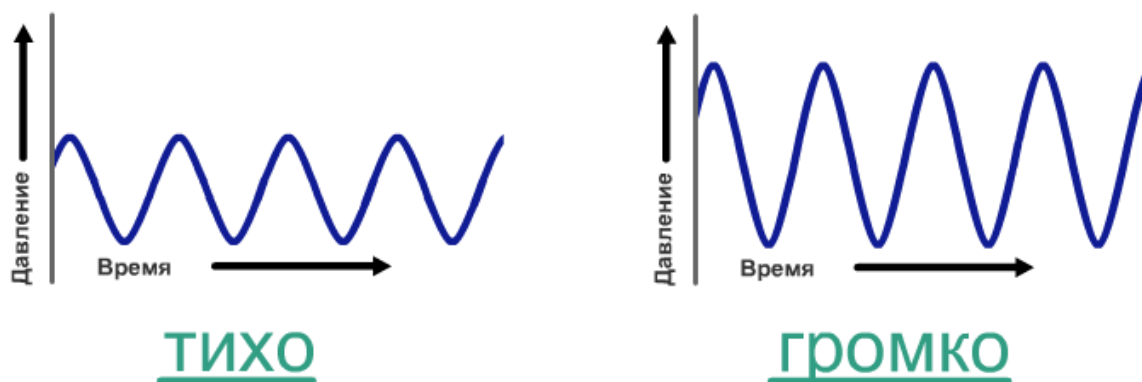


Рисунок 18 – Схематичная визуализация частотных графиков. Слева – низкий бас, справа – гул

Во время проектирования выпускной системы член команды, как гоночный инженер-конструктор, должен понимать, важен ли звук пилоту для возникновения обратной связи между пилотом и двигателем для постоянного анализа состояния ДВС. Опытный пилот болида может по звуку определять неисправности ДВС, к примеру, детонация. Детонация склонна к металлическому звуку, который имеет воспроизведение высоких частот. Конструктив выпускной системы может предсказывать пилоту о неисправностях болида в зависимости от используемых материалов и технических требований к нему. Студент-инженер международного проекта Formula Student должен с пониманием подходить к проектированию.

Дальше рассмотрим зависимость внутреннего диаметра трубы на внешние скоростные характеристики двигателя и требования к ним. Диаметр выпускной трубы оказывает значительное влияние на мощность двигателя, поскольку он непосредственно связан с потоками отработанных газов, которые покидают двигатель. Это влияние можно понять через несколько ключевых аспектов.

Во-первых, слишком узкий диаметр выпускной трубы создает высокое сопротивление потоку отработанных газов. Это сопротивление может привести к тому, что не все отработанные газы эффективно удаляются из камеры сгорания. В результате происходит повышение обратного давления, которое может затруднить новый впуск воздуха в цилиндры, снижая тем самым общую мощность и крутящий момент двигателя. Это особенно заметно на высоких оборотах двигателя, когда необходимо быстрое и эффективное удаление газов для поддержания оптимальной работы.

С другой стороны, слишком широкий диаметр выпускной трубы тоже не является оптимальным. В этом случае скорость потока отработанных газов может снизиться, особенно при низких и средних оборотах двигателя. Низкая скорость потока не позволяет эффективно создавать разрежение в системе, которое бы способствовало лучшему впуску смеси воздуха и топлива. Это может привести к потерям в мощности, так как необходимо поддерживать

определенный уровень скорости для достижения оптимальных характеристик работы двигателя.

Оптимальное значение диаметра выпускной трубы зависит от конструкции двигателя, его рабочей жидкости, а также от назначения автомобиля. Например, для спортивных или высокопроизводительных автомобилей, которые ориентированы на максимальную мощность и скорость, часто предпочитают выпускные системы с более широкими диаметрами, чтобы минимизировать сопротивление и обеспечить быстрый отвод газов, особенно на высоких оборотах. В то же время для обычных гражданских автомобилей может быть предпочтительней выпускная система с несколько меньшим диаметром для лучшей работы в городских условиях и экономии топлива.

Также, в случае гражданских автомобилей, которые имеют в выпускной системе каталитический нейтрализатор, диаметр выпускной трубы должен быть согласован с другими компонентами системы, чтобы избежать конфликтов, которые могут негативно сказаться на производительности и звучании системы в целом. Поэтому важно учитывать все аспекты проектирования выпускной системы для достижения максимальной эффективности и производительности двигателя.

На рисунке 19 показан график, который иллюстрирует среднее значение зависимости диаметра трубы выпускной системы ДВС. Штрих-пунктирная линия указывает на мощностные показания ДВС с малым диаметром выпускной трубы, когда штрих-пунктирная линия с точкой показывает мощностные характеристики ДВС с большим диаметром.

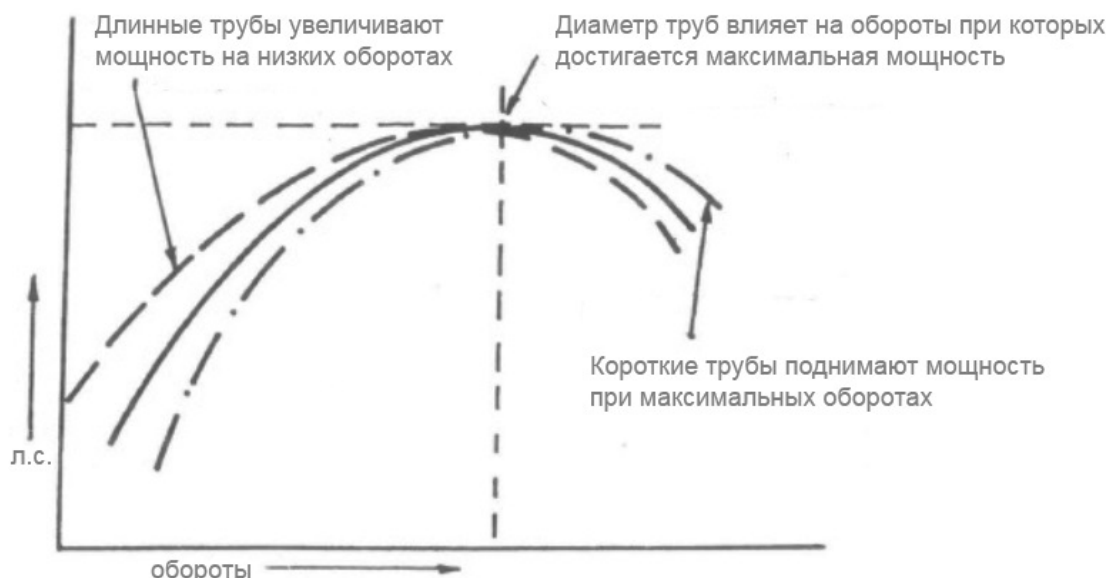


Рисунок 19 – График зависимости диаметра труб выпускной системы

Потери мощности на низких или высоких скоростях вращения коленчатого вала обуславливаются тем, что на определенных давлениях в выпускной трубе происходит разряжение воздуха, приводящее движение отработавших газов из ламинарных потоков в турбулентные.

Турбулентные потоки характеризуются, как хаотичные потоки, непредсказуемым движением воздуха, создавая препятствия самим себе, уменьшая пропускную способность выпускной системе и повышая давления на поршень цилиндра двигателя. Причины создания турбулентных потоков может крыться по многим случаям, а именно:

- неправильно выбран диаметр трубы в каком-либо участке выпускной системе;
- ваш ДВС имеет иной характер условия эксплуатации. Характер можно описать, зная характеристики R/S (Rod to Stroke «отношения диаметра поршня к ходу поршня»), а также технические характеристики ГРМ (газораспределительного механизма).

2.2 Анализ влияния конструктива выпускной системы на внешние характеристики двигателя

Коэффициент очищения камеры сгорания от отработанных газов сильно зависит не только от технических параметров трубы, используемой в выпускной системе, но и от самого конструктива.

На рисунке 20 представлена стандартная выпускная система гражданского автомобиля с указанием основных компонентов выпускной системы.

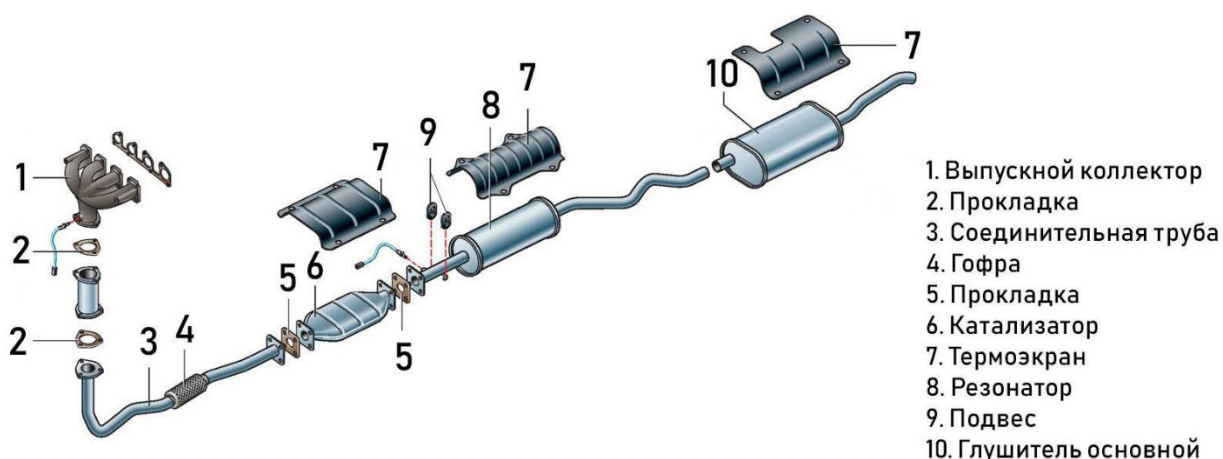


Рисунок 20 – Компонентная составляющая выпускной системы гражданского автомобиля

Выпускной коллектор – деталь, предназначена для соединения отработавших газов с каждого цилиндра двигателя в единую трубу. Как и с теорией значений выбора диаметра и длины выпускной трубы, в выпускном коллекторе работает аналогично. В зависимости от технических параметров шатунно-поршневой группы, выпускные коллектора бывают нескольких типов.

На рисунке 21 слева изображен стандартный выпускной коллектор, имеющий каталитический нейтрализатор (далее – катализатор), назначения

катализатора описано в пункте 6. На рисунке справа – выпускной коллектор стандартного конструктива, только с отсутствием катализатора. Достоинством конструкции является минимализация занимаемого пространства, низкие издержки массового производства из-за простой конструкции, а также малая себестоимость.

Конструктив данных коллекторов называется 4-1, цифры обозначают количество труб идущие от двигателя с последующим соединением. Конструктив 4-1 показывает свои достоинства на средних и высоких оборотах коленчатого вала, в тоже время – на низких скоростях вращения коленчатого вала имеет низкие показатели пропускной способности отработавших газов.

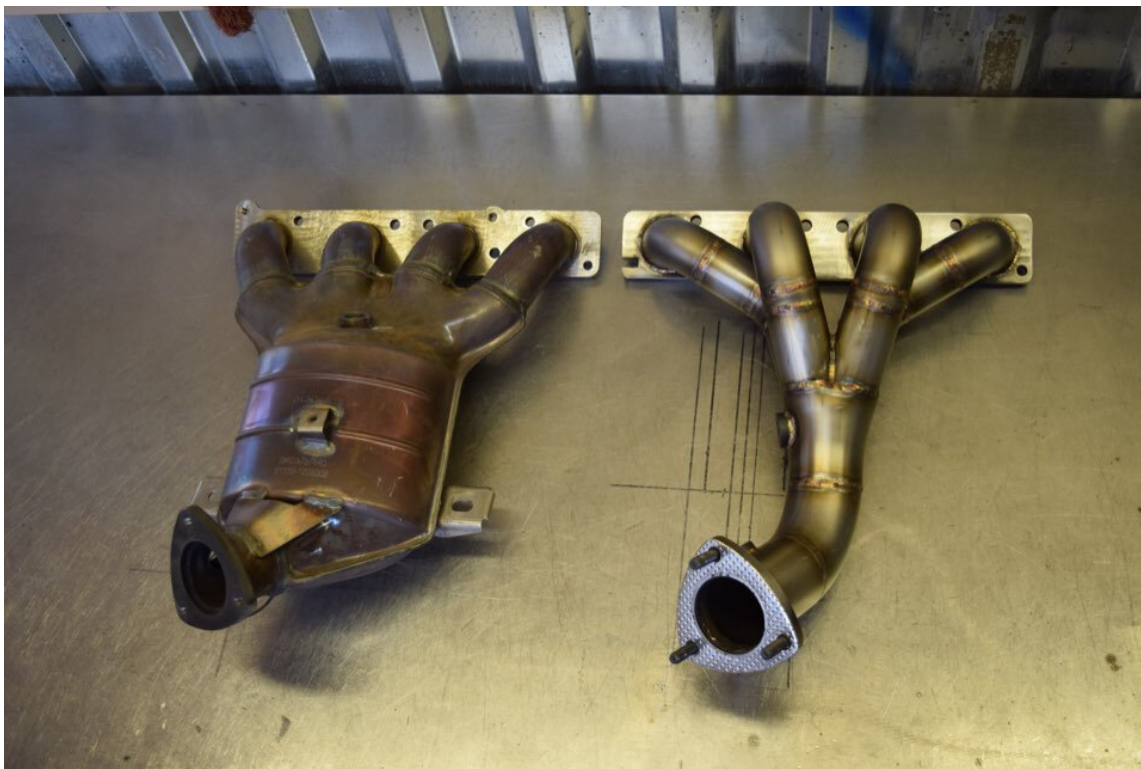


Рисунок 21 – Слева – стандартный выпускной коллектор заводского типа с катализатором. Справа – стандартный выпускной коллектор заводского типа без катализатора

Ниже на рисунке 22 представлен выпускной коллектор, который можно встретить на ДВС имеющие 2 головки блоков цилиндров. Конструктив коллектора позволяет помогать последующему цилиндру выталкивать

отработавшие газы предыдущего цилиндра, повышая этим пропускную способность воздуха с минимальными потерями давления, однако такое явление действует только на малых оборотах двигателя, так как на больших – происходит повышение противодавления в выпускном коллекторе.



Рисунок 22 – Выпускной коллектор для ДВС с 2 головками блока цилиндров

Рисунок 23 имеет выпускной коллектора типа 4-2-1, который представленный как 4-1, только с дополнительными трубами. Такой конструктив позволяет достичь оптимальной пропускной способности между конструктивами представленных на рисунках 13 и 14.



Рисунок 23 – Выпускной коллектор типа 4-2-1

Для ДВС оснащенных динамическим наддувом, то есть с турбонагнетателем, выпускной коллектор выполнен по типу выпускных коллекторов 4-1 или 4-2-1, в зависимости от типа турбонагнетателя.

Соединительная труба – имеет функцию соединения связи между выпускным коллектором и основным глушителем. Как и говорилось в теории о противодавлении, имеет важную роль в системе выпускных систем. Соединительная труба включает такие компоненты как гофра (пункт 4) и в зависимости от компоновочных решений в автомобиле – катализатор.

Гофра – выполняет роль гашения вибраций, которые передаются через выпускную систему от двигателя на кузов автомобиля, уменьшая комфорт управления транспортом, а также убирает вероятность разрушения какого-либо компонента выпускной системы.

Катализатор – он же каталитический нейтрализатор. Устройство, которое предназначено для снижения выпуска токсичных веществ в атмосферу, происходящие после выпуска отработавших газов из камеры сгорания в выпускную систему.

Термоэкран – термозащитный экран защищает кузов и различные детали и узлы автомобиля от термических воздействий, возникающие при работе двигателя. В современном автомобилестроении термоэкраны устанавливают по всей выпускной системе, так как КПД катализатора зависит от его температуры и термозащитные экраны позволяют на меньший отрезок времени прогреть катализатор и поддерживать его температуру.

Резонатор – как и писалось ранее, функция резонатора - снизить звуковое давление от отработавших газов.

Основной глушитель – это основной объем выпускной системы, которые, как и резонатор, снижает звуковое давление работы выпускной системы.

На спортивных автомобилях, используемые в различных дисциплинах автоспорта, так и в международных соревнованиях Formula Student – используется минимальный набор комплектующих деталей выпускной системы. Компонентами являются:

- выпускной коллектор;
- соединительная труба, между выпускным коллектором и основным глушителем (если требуется);
- резонатор или основной глушитель.

Диаметр конечной трубы выпускного коллектора идентичен диаметрам соединительной трубы/резонатора/глушителя. Есть случаи, когда происходит изменение диаметра трубы выпускной системы после выпускного коллектора, из-за следующих причин:

- конструктив какой-либо системы, проходящий в области выпускной системы, требующий расстояние между деталями;
- изменение диаметра трубы в конце системы выпуска, из-за снижения звукового давления по требованию регламента соревнований;
- воспроизвести эффект Вентури.

На рисунке 24 представлено графическое изображение теории эффекта Вентури.

Данный эффект заключается в сужении и расширении сечения трубы для снижения давления в конце выпускной системы с последующим повышением скорости выпуска отработавших газов.

Эффект Вентури используется в автоспорте для минимизации потери пропускной способности впускной/выпускной системы автомобиля, где используются рестрикторы.

Рестриктор – это деталь, предназначена для снижения пропускной способности воздуха через какой-либо систему. Эффект Вентури позволяет уменьшить эффект от рестриктора, а для выпускной системы позволяет изменить резонансные частоты или амплитуду частоты звукового давления, во время грамотного теоретического расчета.

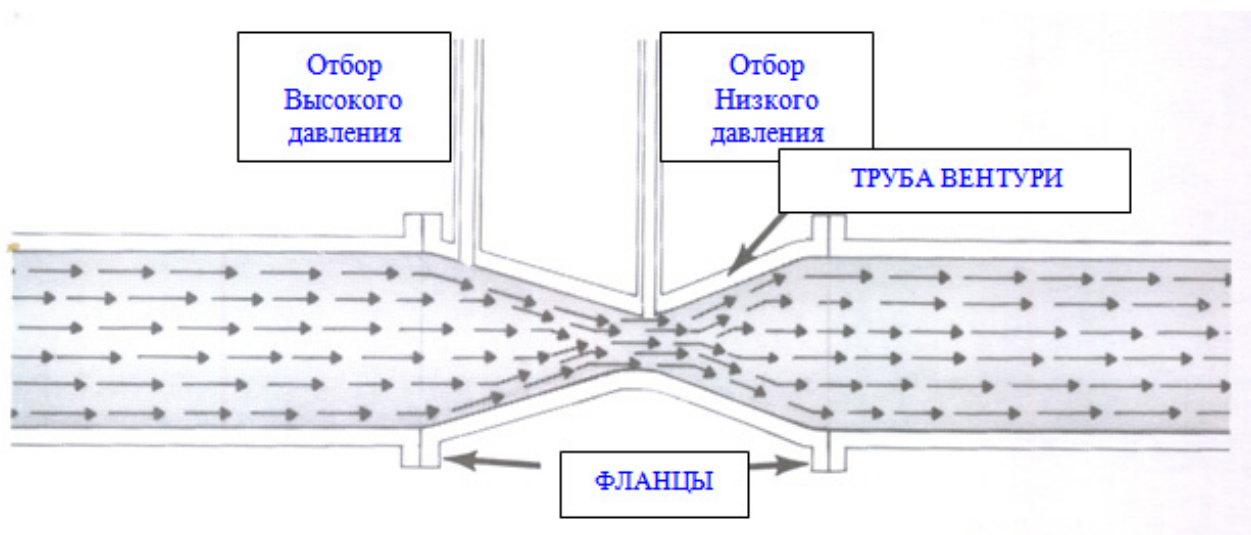


Рисунок 24 – Графический рисунок теории эффекта Вентури

Совокупность данных компонентов позволяет минимизировать создаваемое противодавления в выпускной системе, создавая более благополучные условия для ДВС. Ниже на рисунке 25 представлено одно из измерений внешней скоростной характеристики двигателя автомобиля предназначенный для кольцевых гонок в одной из дисциплин разрешающие небольшие изменения в конструкции автомобилей, в которой двигатели

автомобилей используются приоритетно на высоких оборотах двигателя, обычно от 4500 обр/мин.

Автомобиль оснащен выпускной системой с выпускным коллектором 4-1 с соединительной трубой с внутренним диаметром 60 мм и главным глушителем с эффектом Вентури. Как видно по графику, изменения конструктива выпускной системы привело к увеличению мощности на высоких скоростях вращения коленчатого вала с 5000 обр/мин.

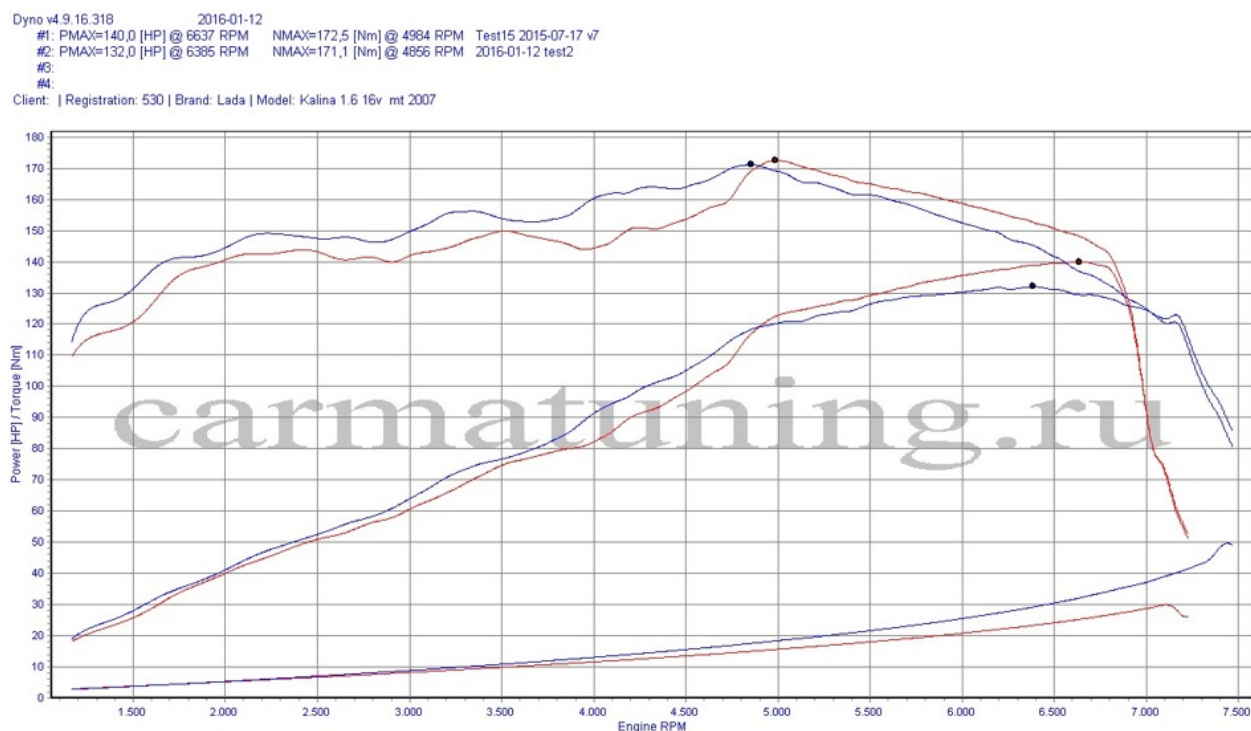


Рисунок 25 – График изменения внешней скоростной характеристики двигателя, после изменения конструкции выпускной системы двигателя

Фиксация выпускной системы происходит минимум в двух точках: болтовым соединением к головке блока цилиндров и демпферными резиновыми изделиями, которые называются подушками подвески выпускной системы и фиксируются через стальной кронштейн, приваренный к кузову автомобиля. Довольно частый случай, когда в автоспорте отсутствует демпферные изделия и происходит жесткая фиксация болтовым соединением

через различные стальные кронштейны к кузову автомобиля. Такое решение также часто используется в Formula Student.

Выводы по разделу

В разделе о теоретических значениях выпускной системы было рассмотрены составляющие детали конструктива и их разновидностей выпускной системы гражданских и спортивных автомобилей с последующим их отличием, включая болида класса Formula Student. Также рассмотрены зависимость внутреннего диаметра трубы выпускной системы на пропускную способность выпуска отработавших газов из камеры сгорания ДВС. Было предоставлено теоретическая часть по зависимости производимого звукового давления от диаметра и длины выпускной системы и значения для пилота гоночного болида. Рассмотрены основные типы выпускных коллекторов с их достоинствами и недостатками.

3 Исследование влияния основных глушителей на характеристики выпускной системы

3.1 Понятие основного глушителя

Как было ранее сказано, в гоночных автомобилях и болидах используется минимальный набор комплектующих выпускных систем. Это также относится и к самим деталям, к примеру – основной глушитель.

Основной глушитель является одним из «ключевых компонентов» выхлопной системы внутреннего сгорания двигателя и предназначен для снижения уровня шума, образующегося при выходе отработавших газов из цилиндров двигателя. В процессе работы двигателя выхлопные газы, выходя под высоким давлением [18] и температурой, создают интенсивные звуковые колебания, которые без эффективного шумоподавления приводят к значительному акустическому загрязнению окружающей среды.

Конструктивно основной глушитель представляет собой корпус, внутри которого размещены различные акустические элементы – камеры, перегородки, перфорированные трубы и звукопоглощающие материалы. Эти элементы обеспечивают изменение направления и скорости потока газов, а также рассеивание и поглощение звуковых волн. Основным принципом работы глушителя основан на интерференции звуковых волн и преобразовании кинетической энергии звука в тепловую энергию, что приводит к значительному снижению уровня шума.

Помимо снижения акустического воздействия, основной глушитель оказывает влияние на параметры выхлопных газов, что может отражаться на динамических характеристиках двигателя и его экологических показателях. Оптимальная конструкция глушителя обеспечивает минимальное сопротивление потоку газов, что способствует сохранению мощности и экономичности двигателя.

В современных системах выхлопа основной глушитель часто комбинируется с дополнительными элементами – резонаторами и каталитическими нейтрализаторами, что позволяет достигать высоких стандартов по шуму и токсичности выхлопных газов, соответствующих международным экологическим нормам.

На рисунке 26 представлено строение современного основного глушителя на гражданском автомобиле, который является трехкамерным типом.



Рисунок 26 – Строение основного глушителя

Конструктив основного глушителя состоит из трех камер, а именно: первая и третья – расширяющимися, вторая – резонирующая.

«Здесь звуковые волны, попадая в камеру, отражаются от ее противоположной стенки и, возвращаясь к входу в камеру в противофазе по отношению к прямой волне, уменьшают ее интенсивность. В глушителях наблюдается рассеивание звуковой энергии в местах изменения проходного сечения канала. Кроме того, отраженные от глушителя волны возвращаются по присоединительному патрубку к источнику шума и, отражаясь от него, движутся опять к глушителю. Этот процесс может повторяться несколько раз.

При этом происходит диссипация акустической энергии вследствие трения и теплопроводности стенок системы шумоглушения» [24].

«Помимо этого, почти в каждом глушителе присутствуют резонансные элементы в виде перфорации труб, по которым проходит поток. В качестве основной акустической характеристики глушителя используются так называемые потери передачи звуковой энергии (TL), представляющие собой десять логарифмов отношения звуковой мощности прямой волны, поступающей на вход глушителя, к звуковой мощности прямой волны на выходе из глушителя.

Этот показатель сравнительно легко может быть измерен или определен расчетным путем. Поэтому эту характеристику целесообразно использовать в исследовательских целях для оценки эффективности той или иной конструкции глушителя, а также при сравнении теоретических и экспериментальных результатов с целью проверки правильности разрабатываемых расчетных схем» [26].

Теоретический расчет объема основного глушителя исходит от предварительных входных данных, которыми являются требуемые минимальным звуковым давлением и резонансным частотам.

3.2 Анализ влияния резонатора Гельмгольца на выпускную систему

Со временем владельцев спортивных автомобилей посещает мысль о повышении мощности ДВС путем изменения геометрических параметров выпускной системы. Автовладельцы при этом не хотят мириться с повышенным звуковым давлением, издаваемым выпускной системой.

Увеличение объемов основных глушителей и резонаторов приводит к увеличению противодавления от 1% до 10%, в зависимости от конструктива компонентов.

Для снижения звукового давления иногда используют резонаторы Гельмгольца.

Резонатор Гельмгольца – это объем, предназначенный для гашения резонансных частот на определенных звуковых частотах, что в свою очередь приводит к снижению звукового давления. Резонатор Гельмгольца, установленный на спортивном автомобиле, представлен на рисунке 27.



Рисунок 27 – Резонатор Гельмгольца

Резонатор Гельмгольца представляет собой полость (резонаторную камеру) с узким входным отверстием (горлом). При прохождении звуковой волны через горло воздух внутри полости начинает колебаться, создавая резонанс на определенной частоте, которая определяется геометрическими параметрами резонатора: объемом полости, площадью и длиной горла.

Другими словами, его работа основана на явлении акустического резонанса: при прохождении звуковых волн определенной длины возникает резонанс, в результате которого энергия звуковой волны частично поглощается или отражается. Частота, на которую настроен резонатор, определяется объемом камеры, длиной и диаметром соединительного канала. Правильно рассчитанный резонатор позволяет эффективно подавлять определенные резонансные частоты, возникающие в выпускной системе.

Частота резонанса f_f резонатора Гельмгольца рассчитывается по формуле (1):

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot L_{\text{эфф}}}} \quad (1)$$

где c – скорость звука в воздухе (примерно 343 м/с при 20 °C),

S – площадь сечения горла,

V – объем резонаторной полости,

$L_{\text{эфф}}$ – эффективная длина горла (с учетом энд-эффекта).

Внедрение резонатора Гельмгольца в выпускную систему может оказать комплексное влияние. Во-первых, это приводит к снижению уровня шума. За счет подавления звуковых колебаний в определенном диапазоне частот, уменьшается общий акустический шум, излучаемый системой выпуска, особенно в области средних оборотов двигателя, где резонанс наиболее выражен.

Во-вторых, происходит повышение эффективности газообмена. Резонатор может использоваться для устранения обратных волн, стремящихся вернуться в камеру сгорания, тем самым улучшая продувку цилиндров. Это положительно сказывается на наполнении цилиндра свежей топливно-воздушной смесью, особенно в многоцилиндровых ДВС.

В-третьих, это помогает в стабилизации работы двигателя. Устранение акустических резонансов способствует более стабильной работе двигателя на различных режимах, снижая вибрации и колебания давления в выпускном тракте.

Кроме того, происходит улучшение экологических характеристик. При улучшении продувки камеры сгорания снижается содержание несгоревших остатков в выхлопе, что способствует уменьшению токсичности отработанных газов.

В спортивной технике, в том числе в гоночных болидах класса Formula Student, резонатор Гельмгольца применяется для точной настройки выпускной системы под конкретные режимы работы двигателя. Это позволяет добиться улучшения отклика на газ, увеличить мощность в заданном диапазоне оборотов и снизить шум до регламентированных значений.

В серийных автомобилях резонаторы применяются в составе сложных глушителей или как отдельные элементы выпускной системы, особенно в конструкциях с турбонаддувом и системами изменения фаз газораспределения, где широкий диапазон оборотов требует адаптивных решений по шумоподавлению и продувке.

Выводы по разделу

В ходе проведенного анализа были рассмотрены конструктивные и функциональные особенности основного глушителя, а также исследовано влияние резонатора Гельмгольца на эффективность работы выпускной системы двигателя внутреннего сгорания.

Установлено, что основной глушитель выполняет ключевые функции по снижению уровня шума и частичному подавлению обратных волн давления, возникающих при работе двигателя. Его конструкция, как правило, включает несколько камер с перфорированными трубами и звукопоглощающими материалами, что позволяет эффективно уменьшать амплитуду звуковых колебаний в широком диапазоне частот.

Дополнение выпускной системы резонатором Гельмгольца позволяет повысить ее эффективность за счет избирательного гашения резонансных частот, возникающих в конкретных режимах работы двигателя. Резонатор снижает уровень акустических шумов, предотвращает возврат отработанных газов в камеру сгорания, тем самым улучшая продувку цилиндров, повышая стабильность работы двигателя и снижая выбросы вредных веществ.

Таким образом, интеграция резонатора Гельмгольца в конструкцию глушителя или в состав выпускной системы в целом способствует улучшению как акустических, так и эксплуатационных характеристик автомобиля. Полученные теоретические выводы могут быть использованы на этапах проектирования выпускных систем с целью достижения баланса между снижением шума, повышением мощности двигателя и соблюдением экологических норм.

4 Проектирование выпускной системы гоночного болида «Formula Student»

4.1 Разработка 3D модели выпускной системы гоночного болида «Formula Student»

Чтобы приступить к разработке выпускной системы требуется подготовить 3D модель будущего болида, а именно воссоздать: пространственную раму, силовую установку, трансмиссию, подвеску, расположение колес, патрубки системы охлаждения. Данный минимальный набор позволяет представить возможные компоновки выпускной системы.

Концепт будущего болида – это иметь развитую аэродинамику. Международные соревнования «Formula Student» в большинстве случаев предоставляли гоночные трассы, где болидам и пилотам было сложно развивать скорость более 60 км/ч, однако в последние года трассы стали более скоростными, где аэродинамика начинает выполнять свою ключевую роль – увеличение скорости болида в поворотах. На этом моменте концепт будущей выпускной системы – проложение выпускного коллектора и компонентов выпускной системы в пределах пространства пространственной рамы болида.

На гоночном болиде команды Togliatti Racing Team 2023 года выпускная система выходила через боковой понтон (рисунок 28), который занимал большую часть понтона и боковой структуры болида, которую можно использовать под аэродинамику. Если разместить выпускную систему продольно болиду, а также в дальнейшем изменить компоновку системы охлаждения ДВС, тем самым освобождая большую полезную зону для реализации аэродинамики и этим иметь больший потенциал на время прохождения круга/трассы.

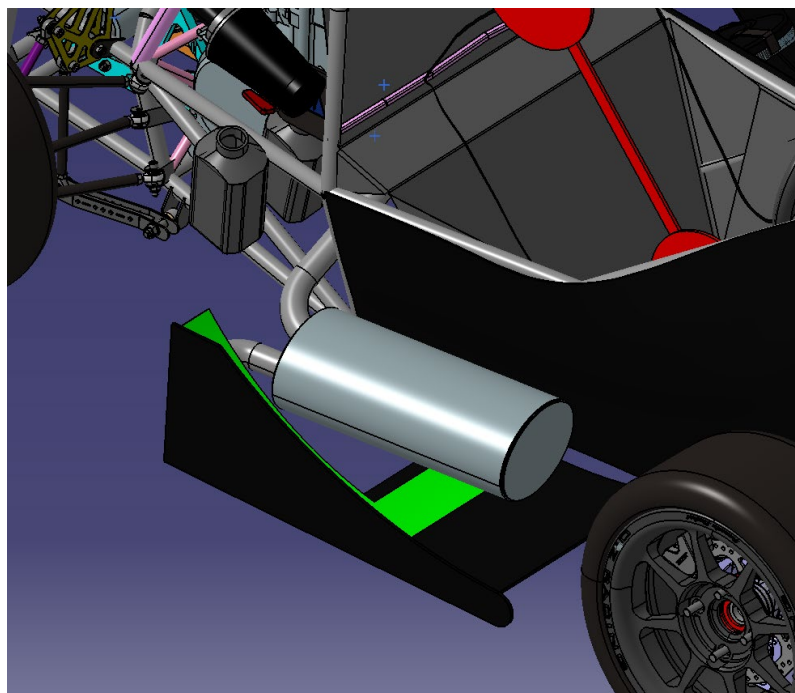


Рисунок 28 – Размещение выпускной системы на гоночном болиде 2023 года

На рисунке 29 предоставлена 3D модель компоновка задней части будущего болида. Данная сборка позволяет выполнить базовые построения выпускной системы с последующим добавлением компонентов системы.

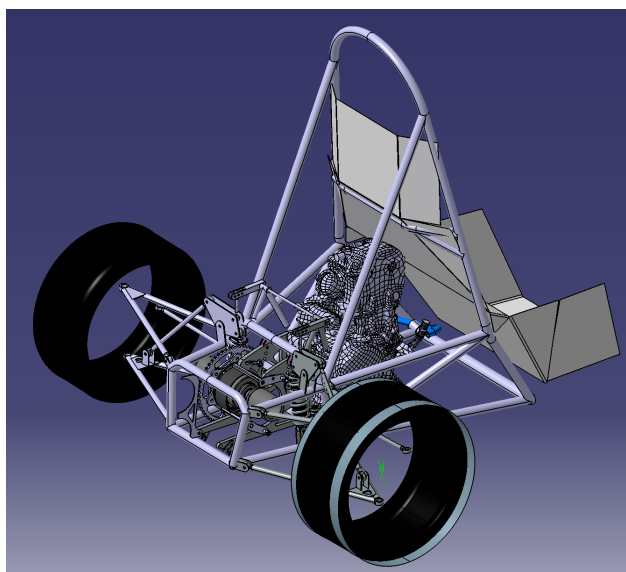


Рисунок 29 – Компоновка задней части будущего болида

Подбор трубы для выпускного коллектора будет исходить от диаметра выпускного канала из головки блока цилиндра – далее ГБЦ. Имея диаметр выпускного канала в 35мм ближайшая трубы подходящего диаметра – 38х1 из нержавеющей трубы марки AISI 409 или титана марки BT-1. Для изготовления гибов трубы требуется знать технологические возможности станка предназначенный для гибки труб. В случае постройки выпускной системы для болида технологические возможности позволяют гнуть данную трубу с радиусом 70 мм и длиной минимального перехвата 60 мм.

Во время прокладывания выпускного коллектора требуется выдерживать расстояние между компонентами болида и самим коллектором, к примеру – фаерволл, топливная система, система охлаждения. Все минимальные расстояния между горячей частью двигателя (системой выпуска) и другими системами прописаны в регламенте международных соревнований FS Rules. В не регламентированных местах минимальное безопасное расстояние составляет 25 мм.

Местом размещением основного глушителя выбрано задняя перегородка пространственной рамы болида. Для подбора возможного объема основного глушителя исходило от площади возможного размещения, которая составляла 350х200, рисунок 30.

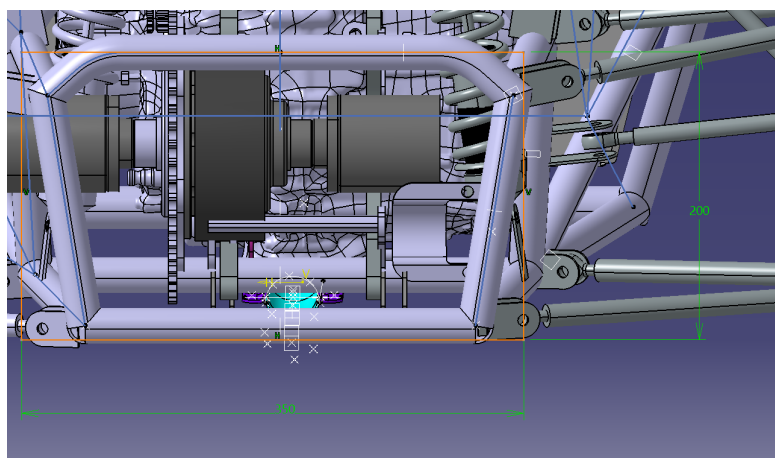


Рисунок 30 – Теоретическая площадь для размещения основного глушителя

4.2 Симуляция работы двигателя в программе Engine Analyzer Pro

Начало работы теоретического расчета основных характеристик ДВС начинается в программе Engine Analyzer Pro. Engine Analyzer Pro – это профессиональная программа, которая предназначена для расчета внешней скоростной характеристики двигателя с предоставлением информации мощности и крутящего момента двигателя в виде конкретных значений или графиков.

Программа позволяет отследить изменение характера двигателя после изменении какой-либо системы двигателя, к примеру: система впуска, система выпуска отработавших газов, геометрии шатунно-поршневой группы и т.д.

Для начала работы в Engine Analyzer Pro следует изучить конфигурацию выбранного двигателя для будущего гоночного болида «Formula Student». Был взят за основу будущей силовой установки двигатель от мотоцикла KTM 390 модельного года 2024. На рисунке 31 показан двигатель от KTM 390.



Рисунок 31 – Двигатель от мотоцикла KTM 390

Двигатель имеет следующие технические данные:

- тип двигателя: одноцилиндровый, четырехтактный;
- объем двигателя: 373,2 см³;
- диаметр цилиндра: 89 мм;
- ход поршня: 60 мм;
- мощность: 32 кВт (43,5 л.с.);
- крутящий момент: 37 Нм;
- расход топлива: 3,37 л / 100 км;
- подъем впускного клапана 6,5 мм, фаза открытия 238 градусов;
- подъем выпускного клапана 6,5 мм, фаза открытия 238 градусов;
- диаметр дроссельной заслонки 42 мм;
- диаметр впускного канала в ГБЦ 40 мм;
- диаметр выпускного канала из ГБЦ 35 мм.

Данные, предоставленные выше, прописываются как основные параметры двигателя в программе-симуляции Engine Analyzer Pro.

Теоретический расчет всегда отличается от практических результатов, для минимизации отклонений итоговых результатов проводится корректировка констант в вводных значениях в самой программе симуляции, к примеру – это преодоление силы n на механические потери.

«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» [7].

«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» [6].

«Кроме того, что известно какой будет использован мотор, перед началом разработки системы выпуска необходимо точно определить положение силового агрегата в пространстве автомобиля, а также понять какие детали окружения будут присутствовать на автомобиле. Итак, основные элементы, которые необходимо иметь на момент начала проектирования, это пространственная рамная конструкция в роли шасси, или же монокок, нужно понимать посадку пилота и габаритные размеры кресла пилота, также необходимо обозначить в пространстве огнеупорную стенку. Кроме того, стоит обозначить также расположение колес и если имеются, то и элементы подвески [3].

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. На рисунке 32 можно увидеть переходной фланец.

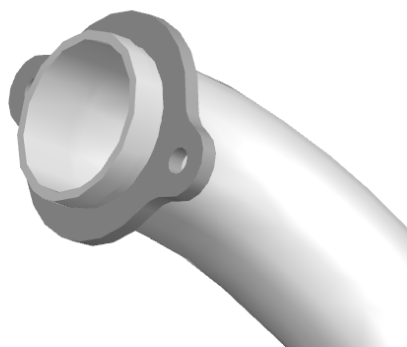


Рисунок 32 – Переходной фланец выпускной системы

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 длинны первичной трубы в 262 мм, это можно увидеть на рисунке 33» [5].

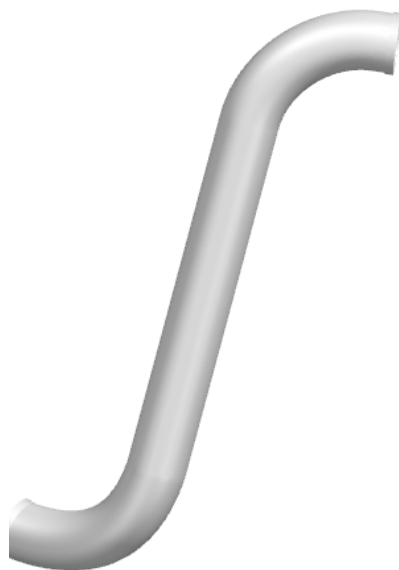


Рисунок 33 – Выпускной коллектор гоночного болида

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. Были также проведены симуляции выпускного коллектора на предмет ламинарности и плавности воздушных потоков, а также на предмет скорости протекания воздушных потоков.

Что касается обеспечения низкого уровня шума выпускной системы гоночного болида класса «Формула Студент», то для этого был разработан глушитель, который можно увидеть на рисунке 34.

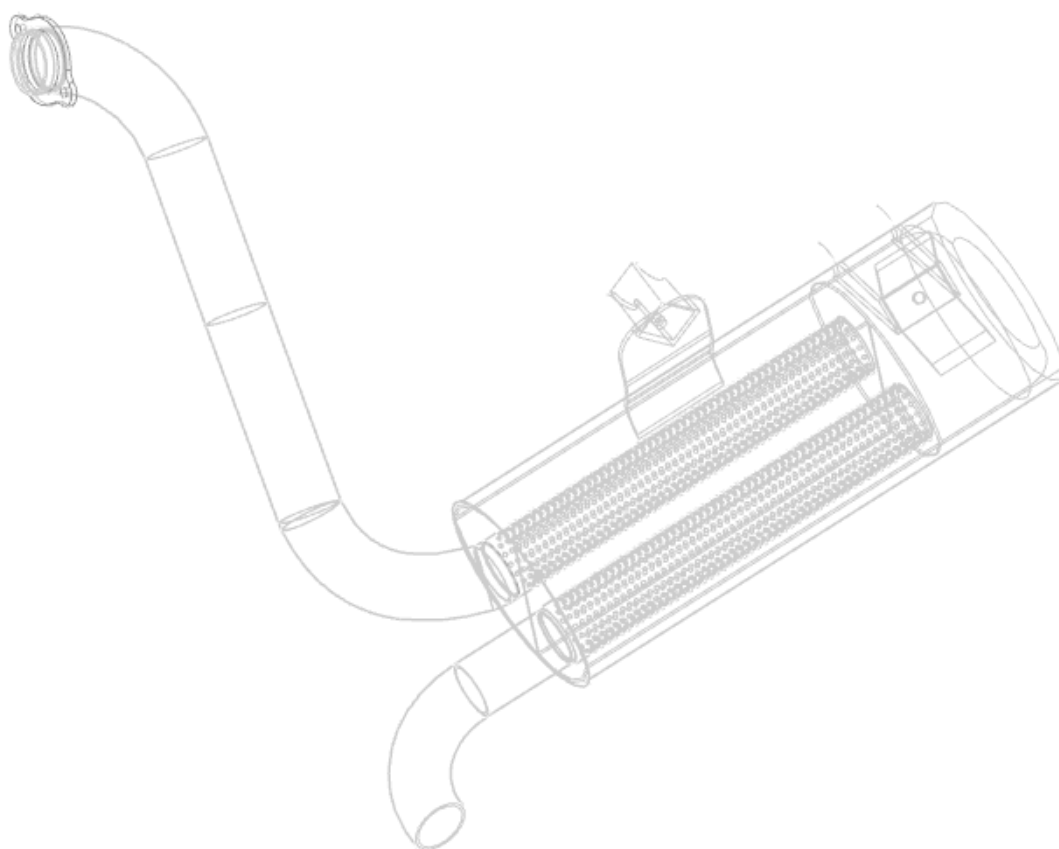


Рисунок 34 – Глушитель гоночного болида в разрезе

«На рисунке 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.

Глушитель изготавливается таким образом, что вся сваренная конструкция самым последним делом вставляется в нержавеющей 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 35» [19].



Рисунок 35 – 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 (2).

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

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 (3) была рассчитана длина свободного выхлопа

$$L = 5100 \times \varphi / n \times 6, \quad (3)$$

где L – длина свободного выхлопа, мм;
 φ – опережение открытия выпускного клапана до нижней мертвой 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 (4):

$$D = \sqrt{2} \times \frac{V}{L1} \times \pi, \quad (4)$$

где D – диаметр первичной трубы, мм;

V – объем цилиндра, м³;

L_1 – 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 (5):

$$D = \sqrt{2} \times \frac{V_T}{L_1} \times \pi, \quad (5)$$

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 (6):

$$t = Q_p + i_{\text{воздуха}} + i_T - \frac{Q_{\text{дис}}}{V_{\Gamma}} \times c_{\Gamma}, \quad (6)$$

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_{Γ} – объем дымовых газов, м³;

c_{Γ} – объемная теплоемкость дымовых газов, кДж/м³» [22].

На рисунках 36-47 представлено введенные данные для симуляции работы двигателя KTM 390 для болида класса Formula Student.

Back

Graph

Print

Help

File

ASCII File

History

Analyze

See-Engine

Send

Stop

Notes

Summary: Detonation likely, Piston speed Extremely high. Click on Notes for more Details.

PkTq=28.0 @ 7000 Avg=22.8

PkHP=41.0 @ 8000 Avg=28.6

You can 'Auto-Link' to Vehicle Programs. Click here to see how.

Engine RPM	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500
Brk Tq, ft-lbs	22,000	21,000	21,000	23,000	24,000	25,000	25,000	25,000	27,000	27,000	28,000	27,000	26,000	25,000	23,000	21,000
Brake HP	8,000	10,000	12,000	15,000	18,000	21,000	23,000	26,000	31,000	34,000	37,000	39,000	41,000	41,000	40,000	39,000
Exh Pres, PSI	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Int Vac, "Hg	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Vol Eff, %	81.0	75.0	76.0	82.0	86.0	89.0	91.0	92.0	100.0	103.0	108.0	110.0	108.0	107.0	103.0	100.0
Actual CFM	11	12	15	19	23	27	30	34	40	44	50	54	57	60	62	63
Fuel Flow, lb/hr	4	4	5	7	8	9	11	12	14	15	17	19	20	21	22	22
Nitrous, lb/hr	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Ntrs Fuel, lb/hr	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
BMEP, PSI	149	144	145	154	160	166	166	167	180	183	187	185	179	170	156	146
A/F Mxtr Qlty, %	97.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
BSFC, lb/HP-hr	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
Thermal Eff, %	34.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	35.00	35.00	35.00	34.00	34.00	34.00

Valve Flow & Cam Calculations

Overlap Area, deg*sq-in

8.8

Ulv Area, deg*sq-in

235.4

163.0

Total Exh/Int %

69.3

Total Avg Flow Coef

0.272

0.291

Lobe Separation, deg

107.0

Lobe Area, inch*deg

31.33

31.33

Overlap, deg

61

Duration @ .003, deg

275

275

Overlap @ .050, deg

14

Opening Events, deg

29

63

Closing Events, deg

66

32

Duration @ .050, deg

228

228

Opn Evnts @ .050, deg

7

41

Cls Evnts @ .050, deg

41

7

Lobe Centerlns, deg

107.0

107.0

Grss Tappet Lft, in

0.394

0.394

Рисунок 36 – Выходные данные двигателя KTM 390 для болида класса Formula Student

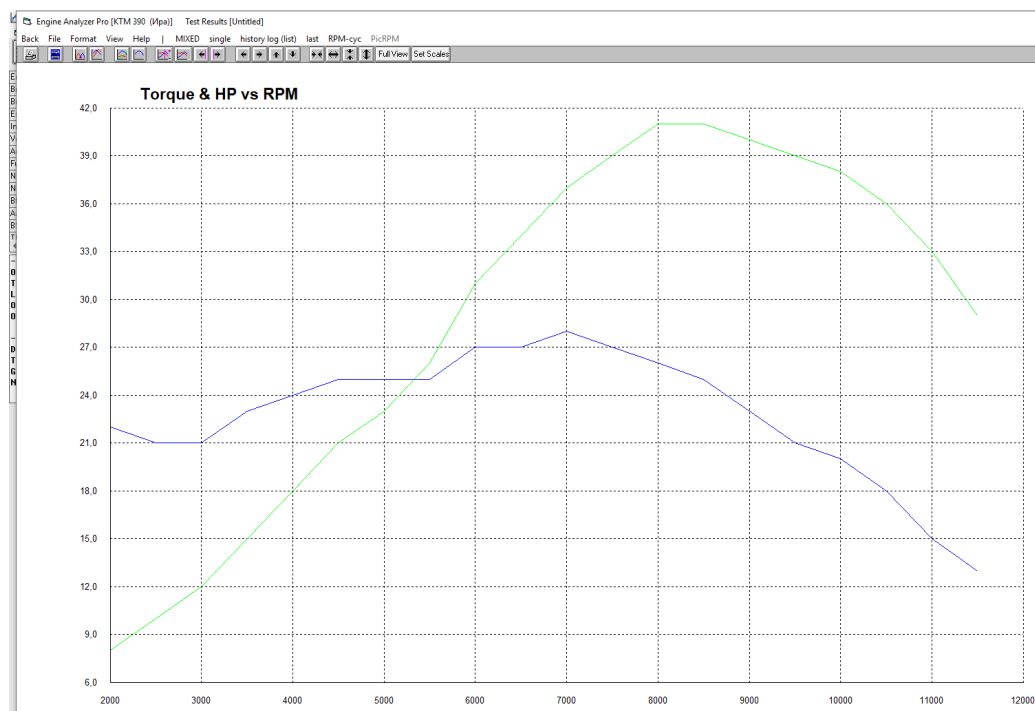


Рисунок 37 – График внешней скоростной характеристики двигателя KTM 390 болида класса Formula Student

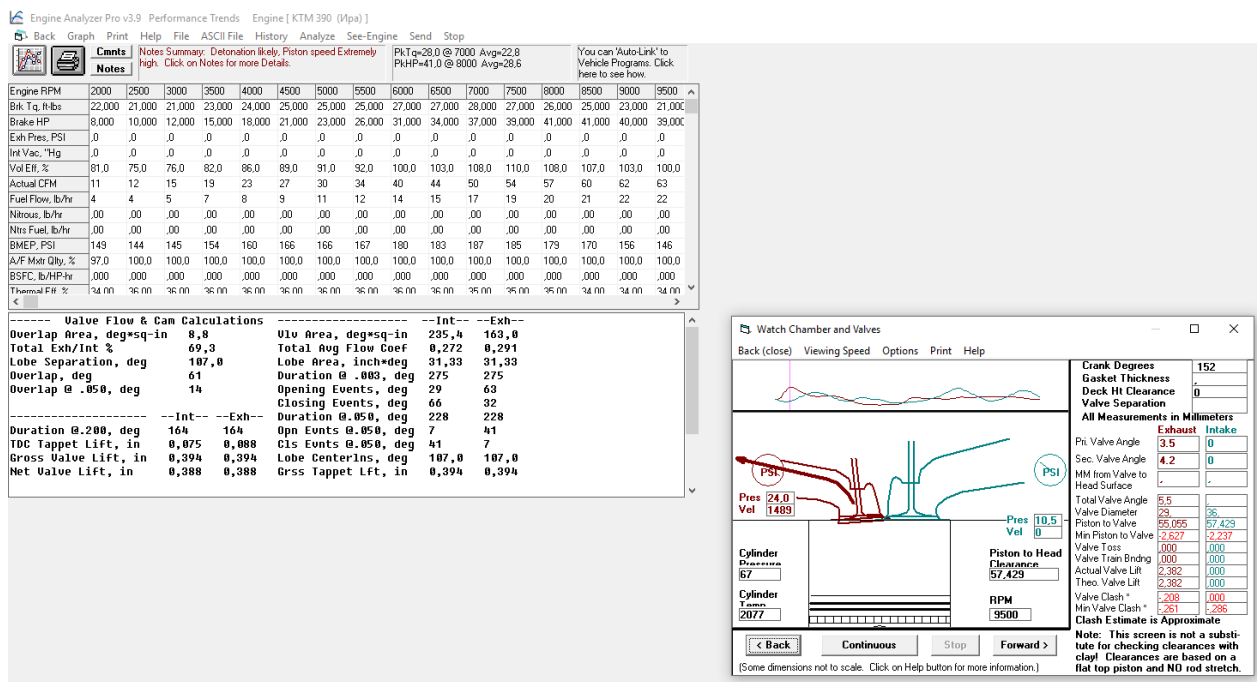


Рисунок 38 – Скорость и давление ТВС во время такта выпуска

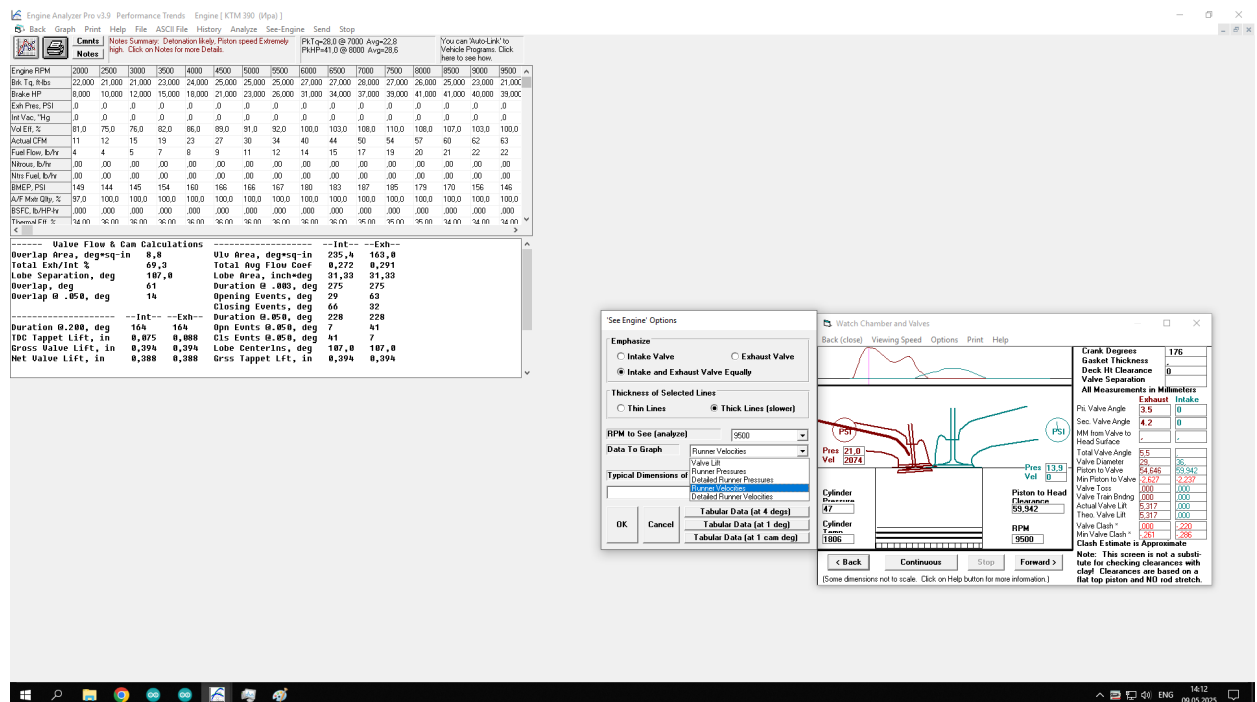


Рисунок 39 – Указание пиковой скорости отработавших газов в выпускной канале головки блока цилиндра

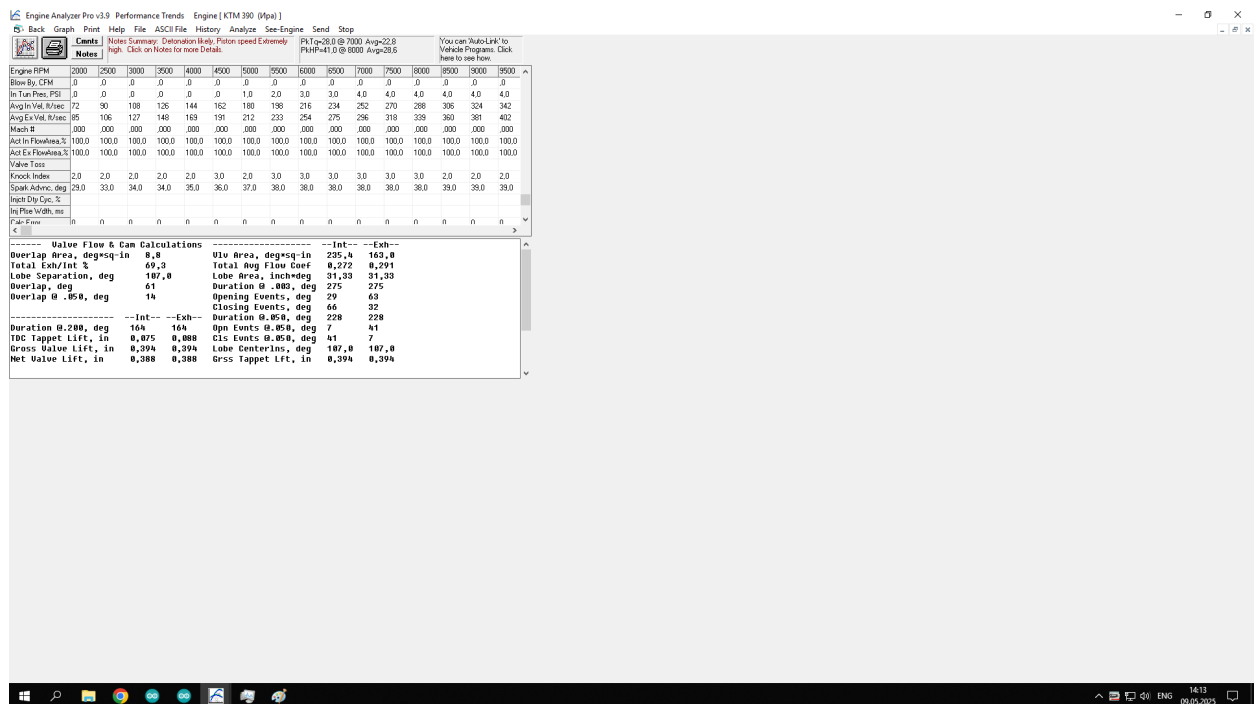


Рисунок 40 – Скорость и давление ТВС и отработавших газов на определенных скоростях вращения коленчатого вала

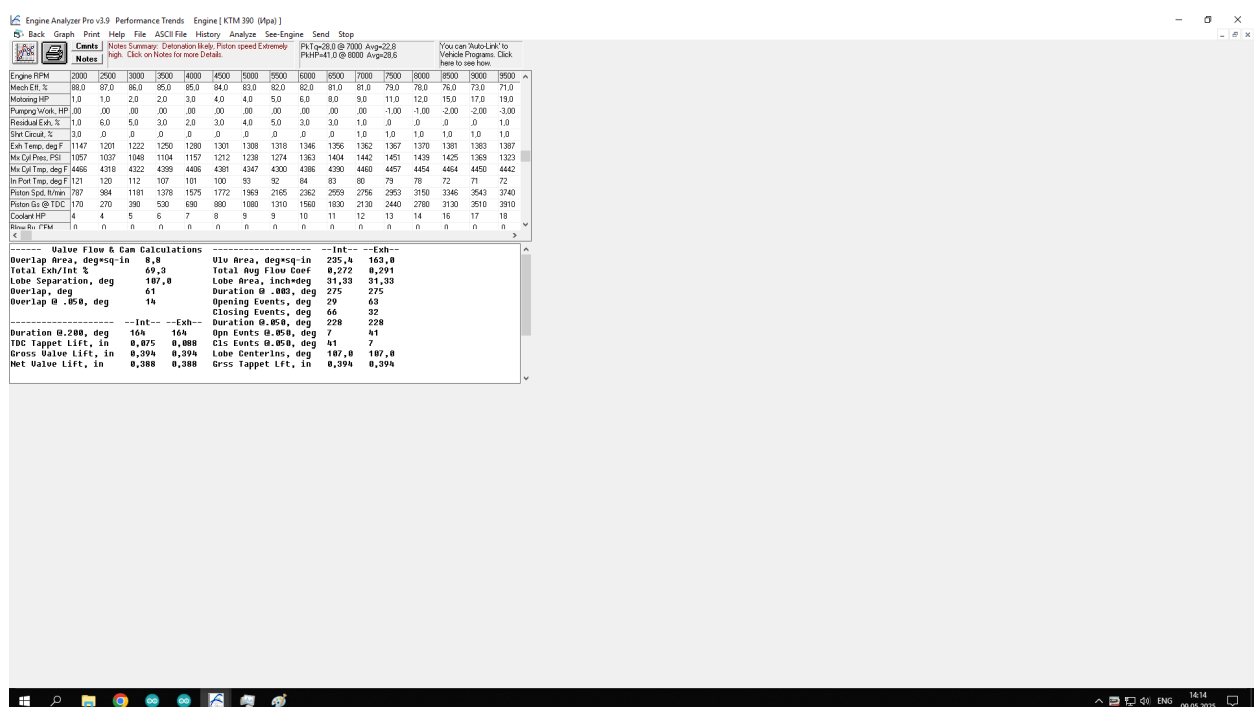


Рисунок 41 – Температура отработавших газов в выпускной канале головки блока цилиндра

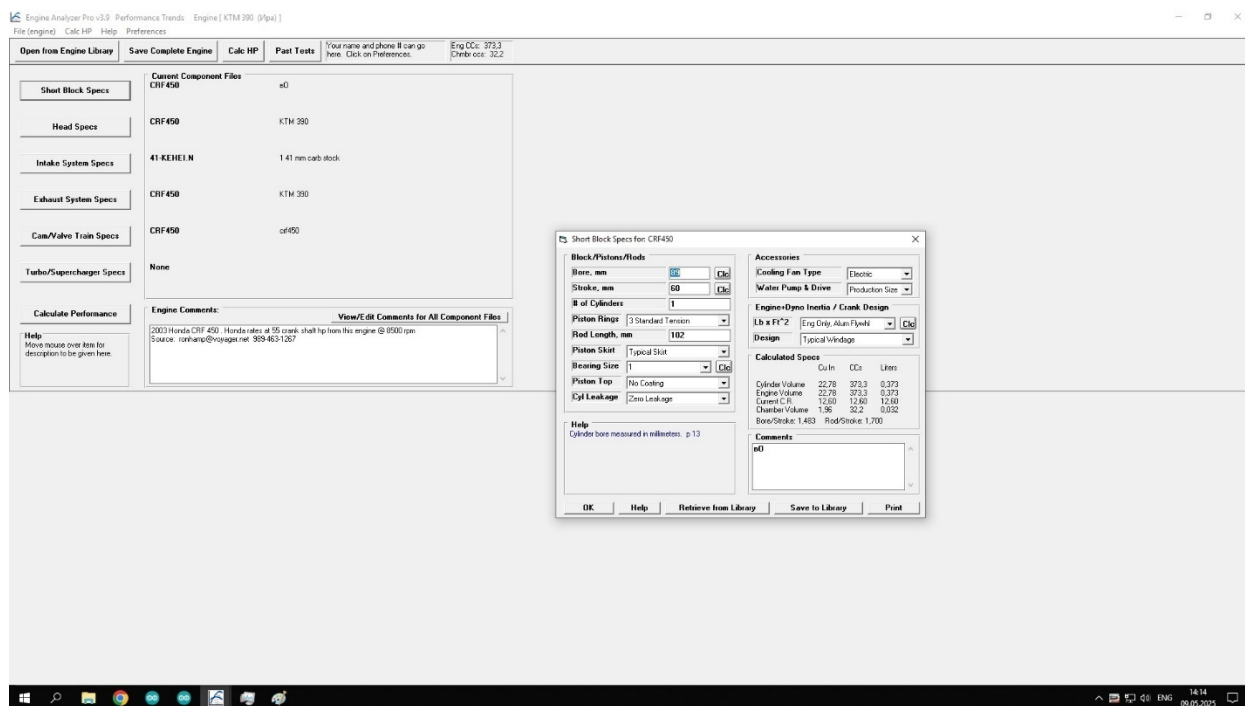


Рисунок 42 – Вводные данные в программе Engine Analyzer Pro для блока цилиндра

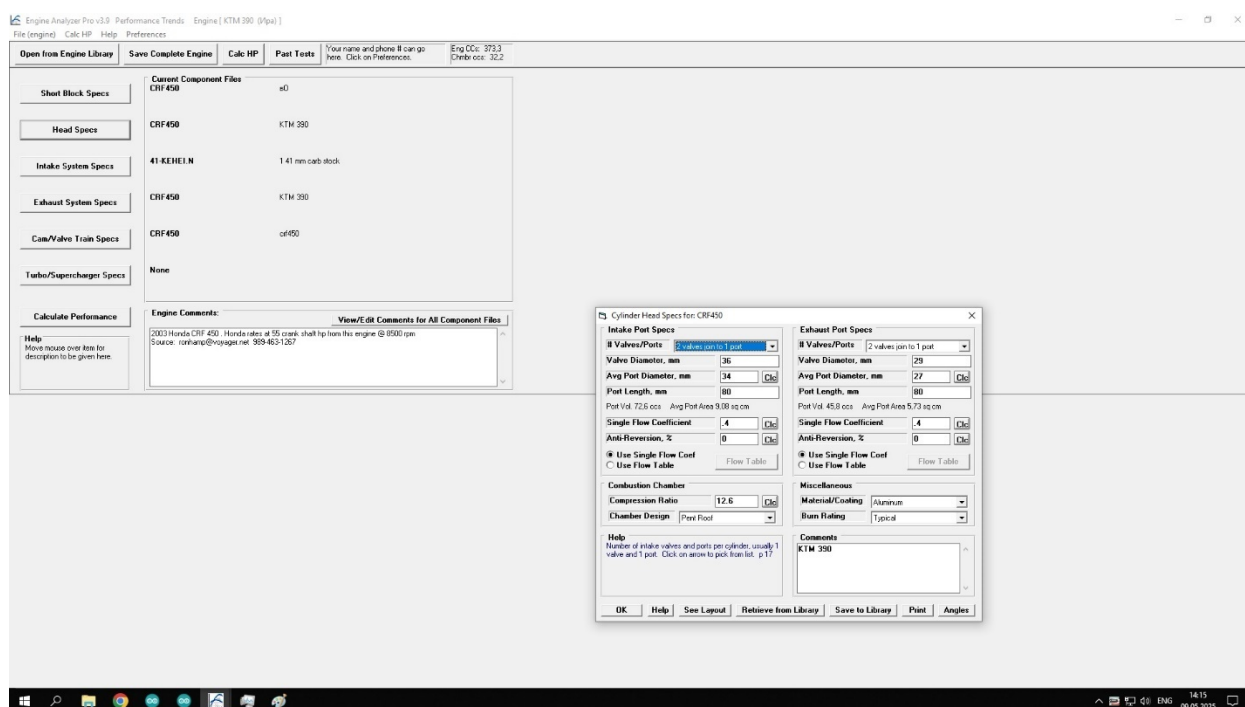


Рисунок 43 – Вводные данные в программе Engine Analyzer Pro для головки блока цилиндра

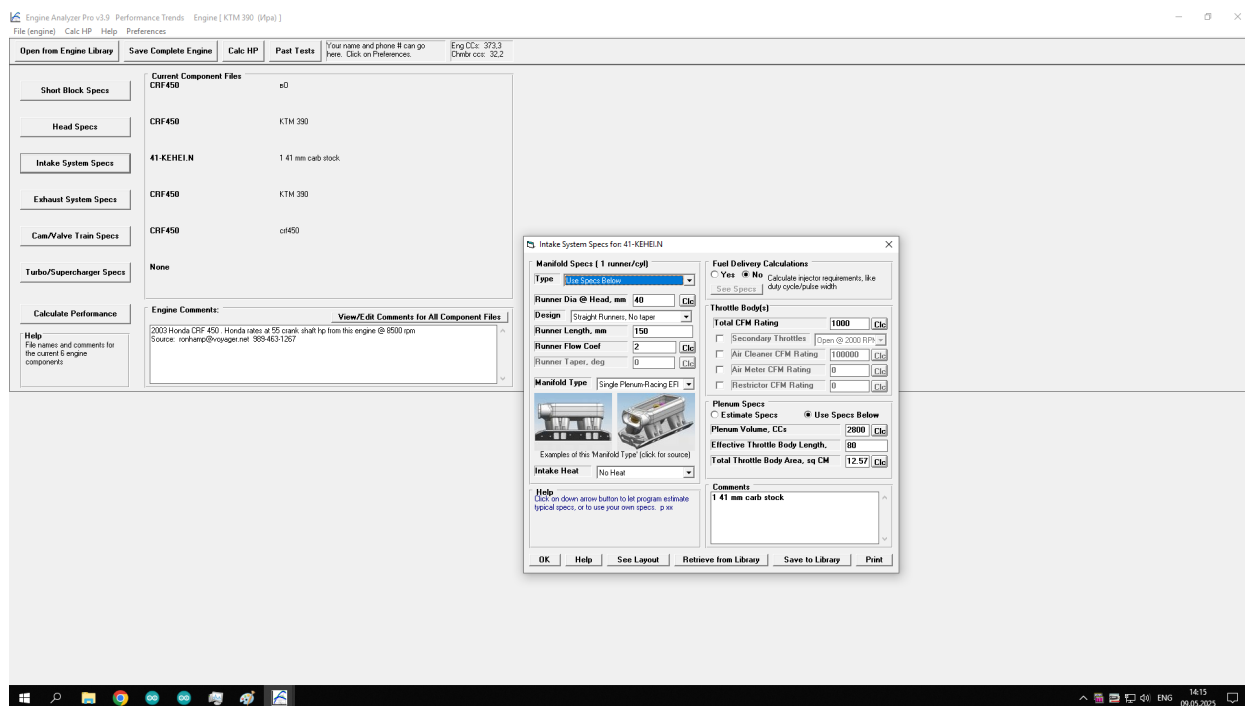


Рисунок 44 – Вводные данные в программе Engine Analyzer Pro для системы впуска

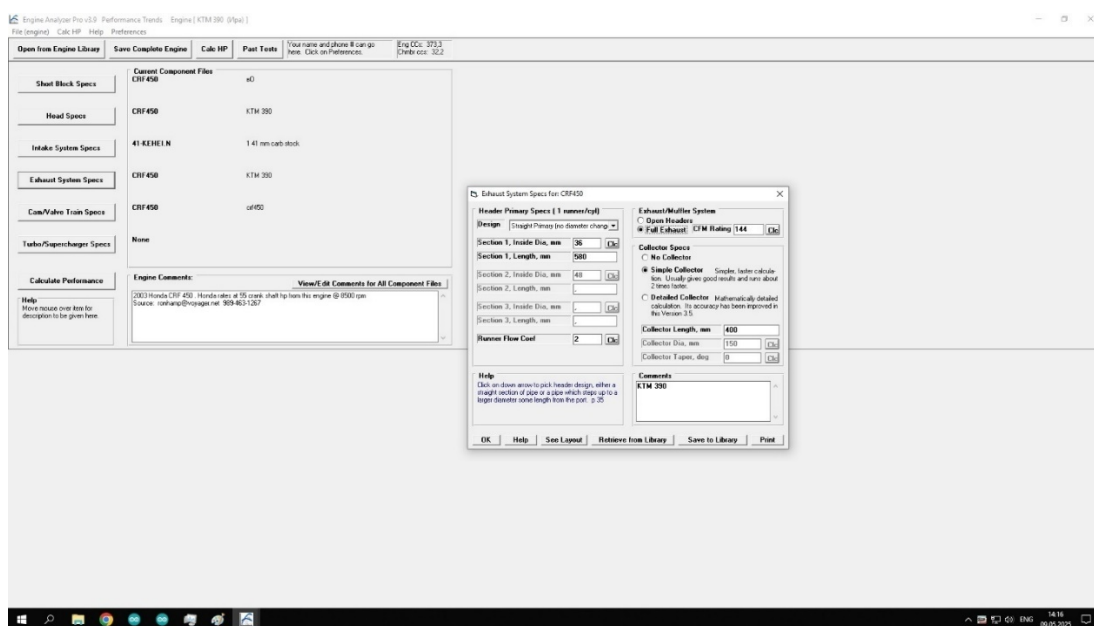


Рисунок 45 – Вводные данные программе Engine Analyzer Pro для выпускной системы

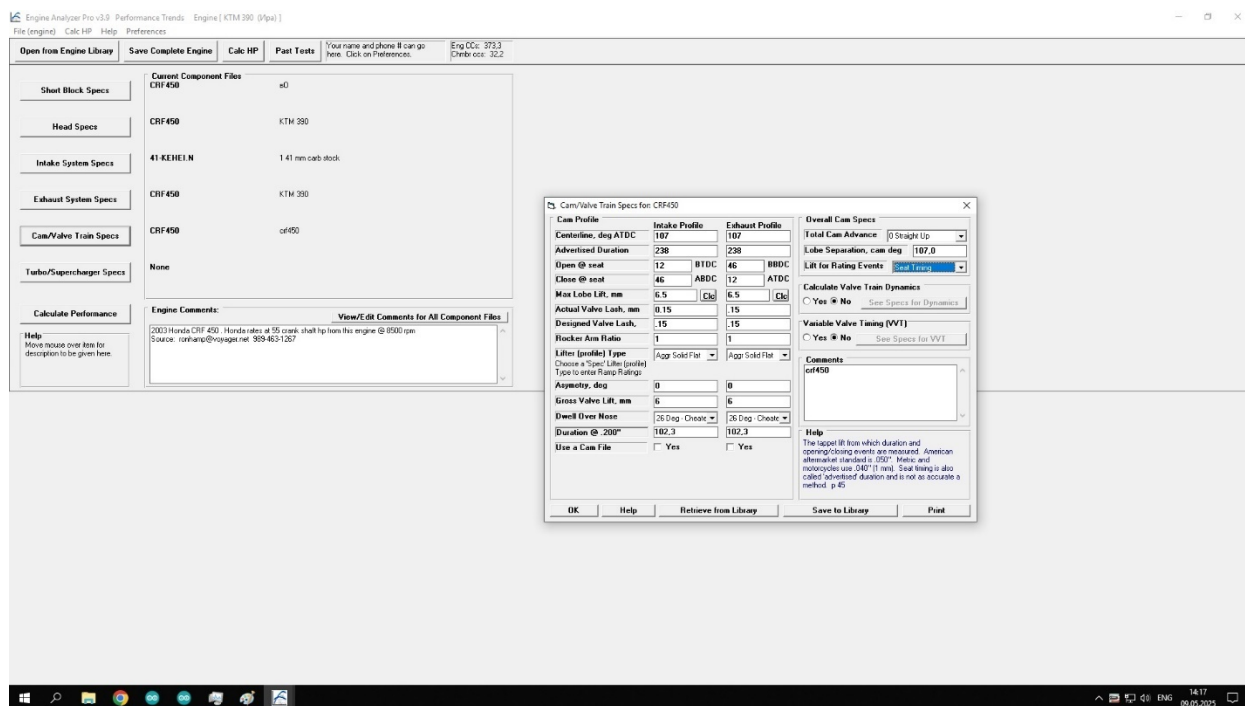


Рисунок 46 – Вводные данные в программе Engine Analyzer Pro для распределительного вала

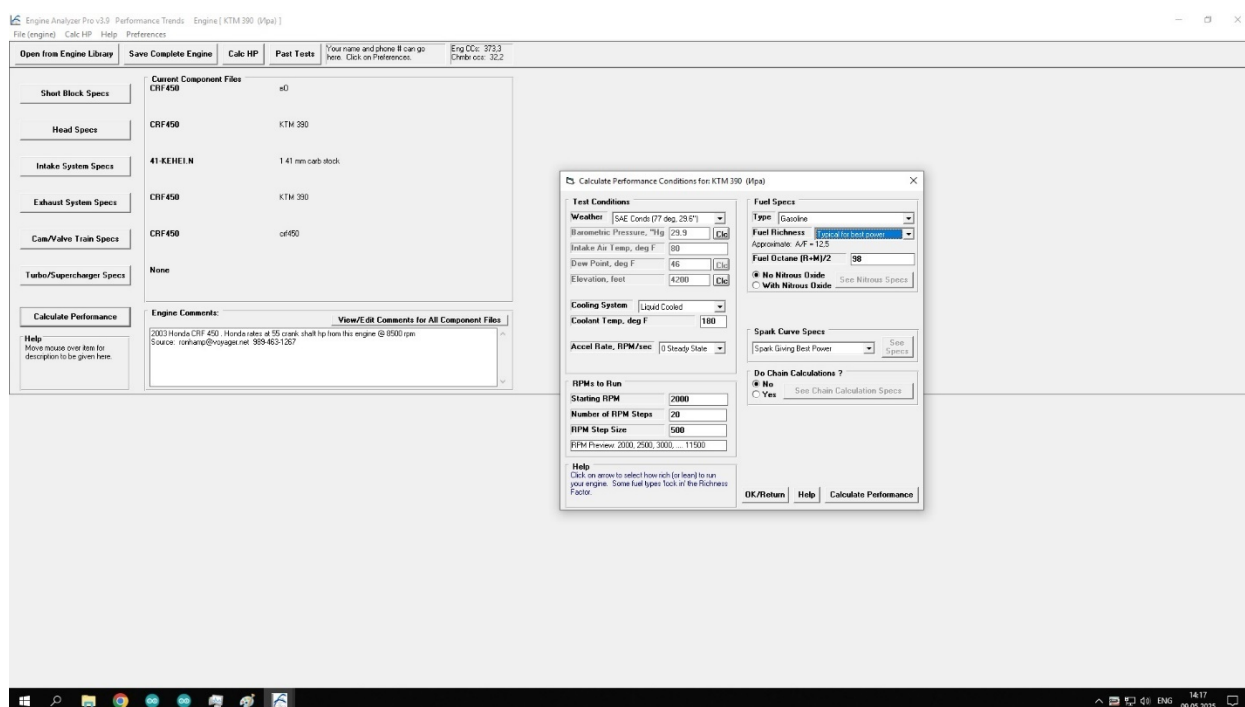


Рисунок 47 – Вводные данные в программе Engine Analyzer Pro для введения стандарта измерения мощности

Выводы по разделу

В рамках данного раздела была выполнена разработка 3D-модели выпускной системы гоночного болида класса Formula Student, а также проведена симуляция работы двигателя с использованием программного обеспечения Engine Analyzer Pro.

Разработка 3D-модели позволила реализовать выпускную систему, соответствующую техническому регламенту международных соревнований и учитывающую геометрические и конструктивные ограничения, связанные с компоновкой болида и типом используемого силового агрегата. При проектировании были использованы методы инженерного моделирования, обеспечивающие оптимальный баланс между длиной, диаметром и формой трубопроводов для достижения требуемых характеристик газообмена и шумоподавления.

Симуляция в среде Engine Analyzer Pro предоставила возможность оценить влияние параметров выпускной системы на рабочие характеристики двигателя, включая крутящий момент, мощность, давление в цилиндрах и эффективность продувки. Моделирование позволило выявить оптимальные значения геометрических параметров выпускного тракта и подтвердить эффективность предложенной конструкции с точки зрения увеличения мощности и стабильности работы ДВС.

Таким образом, взаимосвязанное применение средств 3D-моделирования и численного моделирования процессов внутри двигателя позволяет на этапе проектирования выпускной системы максимально приблизиться к реальным условиям эксплуатации и обеспечить соответствие конструкции как инженерным требованиям, так и регламентам соревнований Formula Student. Полученные результаты будут использованы для дальнейшей оптимизации конструкции и повышения эффективности гоночного болида.

Заключение

В рамках данной магистерской диссертации была выполнена комплексная разработка выпускной системы для гоночного болида, создаваемого в соответствии с регламентом международных соревнований Formula Student. Целью исследования являлось проектирование эффективной выпускной системы с учетом требований к производительности, акустическим характеристикам и соответствию конструктивным ограничениям автомобиля.

В ходе работы был проведен теоретический анализ устройства основного глушителя и влияния резонатора Гельмгольца на характеристики выхлопной системы. Установлено, что применение акустических резонаторов позволяет улучшить продувку камеры сгорания, повысить стабильность работы двигателя и снизить уровень шума, что имеет особую значимость в условиях жестких регламентных ограничений.

На основе проведенных исследований была создана 3D-модель выпускной системы с применением современного программного обеспечения. Геометрическая компоновка, подобранная в соответствии с архитектурой болида и установленным двигателем, была дополнительно проанализирована в среде Engine Analyzer Pro. Симуляционные расчеты позволили оценить влияние конструкции на параметры работы силового агрегата и подтвердить эффективность принятых инженерных решений.

Результаты работы могут быть использованы в деятельности студенческой команды при разработке новых поколений болидов, а также служат практической иллюстрацией применения теоретических знаний и инженерных инструментов в условиях реального проектирования. Проведенное исследование демонстрирует актуальность интеграции цифрового инжиниринга, акустического анализа и компьютерного моделирования в образовательных и конструкторских проектах технической направленности.

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: 07.10.2024).
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: 07.05.2025).
4. 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.
5. Выхлопная система [Электронный ресурс] : URL: <http://www.avtika.ru/qa/393-vykhlopnaia-sistema> (дата обращения: 08.05.2025).
6. Доводка выхлопной системы атмосферных ДВС [Электронный ресурс] : URL: https://azlk-team.ru/articles/stati_s_clubazlknet/dovodka_vykhlopnoj_sistemy_atmosfernykh_dvs/ (дата обращения: 08.06.2025).
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. Мигуш С.Е., Герасимов Д.Н., Никифоров В.О., Разработка математической модели инжекторного двигателя. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2003. С. 10-17.
9. Модернизация системы выпуска отработавших газов [Электронный ресурс] : URL: <http://pajero.us/repair/107.shtml> (дата обращения: 08.09.2024).
10. Мохамед Б., Кароли Я., Зеленцев А.А. Трехмерное моделирование течения газа во впускной системе автомобиля «Формулы студент» // Журнал

Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2020. С. 597-607.

11. 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.

12. Регламент международных соревнований 2022 Formula SAE® Rules.

13. Решетнев Е. Engine analyzer pro v3.9-Разбор на части. Настройка программы компа. Блок цилиндров. [Электронный ресурс] URL. (дата обращения 05.02.2025).

14. Решетнев Е. solidworks+EAP 3.9+Excel=динамическая продувка впуска BMW M30. [Электронный ресурс] URL. <https://www.drive2.ru/b/498712911787590262/> (дата обращение 15.05.2025).

15. Савельев А.В., Рыбин Н.Н., Диагностирование герметичности впускного тракта автомобильных двигателей по выходу подаваемого в него дыма // Вестник Курганского государственного университета. 2015. №3. С. 68-71.

16. Сергель, Н.Н. Технологическое оборудование машиностроительных предприятий: учеб. пособие / Н. Н. Сергель. - Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2013. - 732 с.

17. Скарятин Д. А., Егоров А. В., Чеченев М. Р., Олешицкий С. В. Улучшение скоростных характеристик двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №9. С. 207–210.

18. Фомин В.М. Хергеледжи М.В., Исследование резонансных систем с целью оптимизации параметров впускного тракта двигателя гоночного автомобиля Formula SAE // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2010. №2. С. 80-84.

19. Шарандин В. Тонкости настройки форсированных двигателей работающих на современных ЭБУ. [Электронный ресурс] URL. <https://www.drive2.ru/b/2753723/> (дата обращение 15.11.2022)

20. Швецов А.Ю., Улучшение динамических показателей двигателя внутреннего сгорания. // Вестник НГИЭИ. 2010. С. 142-150.

21. CBR 600 RR -- Part One: On Paper [Электронный ресурс] : URL <http://www.motorcycle.com/manufacture/honda/2003-cbr-600-rr-part-one-on-paper-1227.html> (дата обращения 07.05.2035).

22. 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).

23. DALHOUSIE FORMULA SAE [Электронный ресурс] : URL: <https://blogs.dal.ca/formulaSAE/2012/03/27/few-powertrain-updates/> (дата обращения: 07.09.2024).

24. Exhaust Systems – Выхлопные системы [Электронный ресурс] : URL: http://ideal-plm.ru/flowmaster/exhaust_systems.html/ (дата обращения: 01.10.2024).

25. Formula Student [Электронный ресурс] : URL: <https://fsoulu.wordpress.com/> (дата обращения: 07.06.2025).

26. Graham Bell A. Performance Tuning in Theory and Practice Four Strokes [Текст] / A. Graham Bell. Haynes Publishing Group, 1981. - 252 p.

27. Honda CBR600RR (2007) [Электронный ресурс] : URL: <http://www.bikewalls.com/wallpaper/CBR600RR/31464631/1024x768.html> (дата обращения: 07.05.2025).

28. 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).

29. 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).

30. 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: 07.04.2025).