

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)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Эксплуатация транспортных средств

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Проектирование и разработка впускного ресивера для двигателя  
согласно эксплуатационным требованиям регламента проекта «Формула  
Студент»

Студент

М.А. Валеев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент А.В. Бобровский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Тольятти 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Состояние вопроса.....	7
1.1 Особенности применения ресивера двигателя согласно регламенту Rules FSG .....	9
1.2 Существующие подходы к проектированию и изготовлению ресиверов “Формула Студент” .....	12
2 Теоретические основы зависимости длинны раннера, динамические характеристики ДВС от геометрических параметров ресивера.....	20
2.1 Анализ влияния объема и формы ресивера на мощность и крутящий момент ДВС .....	29
2.2 Анализ влияния конструктивных особенностей ресивера на значение эффективной частоты вращения коленчатого вала.....	35
2.3 Топливная эффективность теоретические зависимости .....	37
3 Разработка технологического обеспечения исследований влияния конструкции ресивера на динамические характеристики ДВС .....	41
3.1 Подбор технологической оснастки и изготовление ресивера.....	41
3.2 Проектирование технологической оснастки для размещения двигателя на нагрузочный стенд .....	46
3.3 Сборка и установка на нагрузочный стенд, подготовка экспериментальной установки.....	49
4 Фактические испытания двигателя .....	59
4.1 Описание характеристик для корректировки.....	59
4.2 Характеристики полученного ресивера.....	62
5 Корреляция с результатами исследования. Разработка рекомендаций для проектирования ресивера болида «Формула Студент» .....	64
5.1 Анализ экспериментальных результатов по кривой со стенда и соответствие расчётам .....	64
5.2 Практическое использование результатов .....	65
Заключение .....	69
Список используемых источников .....	72

## Перечень сокращений и обозначений

ДВС- Двигатель внутреннего сгорания

КПД – Коэффициент полезного действия

НМТ – Нижняя мертвая точка

ВМТ – Верхняя мертвая точка

ГВТ – Газовоздушный тракт

ЕАР – Engine Analyzer Pro

ГБЦ – Головка блока цилиндра

ЧПУ – Числовое программное управление

КПП – Коробка переключения передач

ЭБУ – Электронный блок управления

## Введение

В промышленности машиностроение имеет большой вес. Производимая продукция механизмы, имеющие разное предназначение, находят свое предназначение во множество отраслях промышленности. От уровня развития машиностроения зависят как темпы перехода на новые технологии, так и возможность смены устаревшего оборудования. Рост промышленности, а также темпы переоборудования на новые технологии, в значительной степени зависят от уровня развития машиностроения и специалистов.

На территории ТГУ уже около 14-и лет существует проект «Формула студент» которая является инженерно-спортивным состязанием среди высших учебных заведений и имеет международный статус. Сам проект больше опирается на инженерное направление, необходимость в умении обосновывать свою точку зрения, получить навыки в представлении готового продукта, получить опыт в оптимизации и улучшениях готового продукта. Возможностью участия в соревнованиях считается болид 1-го года, что означает на каждый год для участия в соревнованиях необходимо иметь либо абсолютно новый болид, либо не менее 70% изменения существующего, болид должен быть выполнен в соответствии всем правилам регламента, основным критерием которого является безопасность во время динамических дисциплин, так как во всем учувствуют студенты. Несильные ограничения позволяют наблюдать разнообразие форм и типов болидов, что является редким случаем в автоспорте. Мощность двигателя не имеет ограничений, также, как и количество цилиндров. Наличие ограничения пропускной способности воздуха, достигается путем установки рестриктора, позволяет добиться одинаковых условий для всех команд и обеспечить безопасность. Команды имеют возможность разрабатывать двигатели самостоятельно, но так как это имеет высокую стоимость, выбор останавливается на серийных мотоциклах, из-за широкого применения. Впускная система является одним

из основных компонентов влияющих на мощностные характеристики ДВС. Наличие ограничения пропускной возможности воздуха приводит к невозможности работы двигателя по стандартным настройкам. Это приводит к необходимости адаптации двигателя под полученные условия, с задачей сохранением мощностных характеристик двигателя под условия трассы «Формула студент», где дальнейшая подгонка происходит путем изменения передаточного числа главной передачи от ДВС на дифференциал.

На соревновании есть такие дисциплины как «Design Report» и «Cost Manufacturing Report» где необходимо аргументировать свое техническое решение, а также обосновать стоимость и возможность рассмотрения производства в массовых масштабах. На основании всего вышесказанного, а также динамические дисциплины, судьи начисляют баллы, которые влияют на рейтинг команды.

Главной задачей проекта считается обеспечить студентам возможность показать себя на практике применяя накопленные знания. После окончания ВУЗа большая часть ребят принимавшая участие в данных соревнованиях приобретают статус грамотных специалистов в своих сферах, за счет опыта, приобретенного в процессе работы в проекте.

Цель работы: разработать эффективный впускной ресивер в соответствии эксплуатационным требованиям регламента проекта «Формула Студент».

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Рассмотрение предыдущего ресивера и аналогов «Формула Студент»,
- 2) Проектирование и изготовление оснастки и самого впускного ресивера,
- 3) Проектирование и изготовление оснастки для размещения ДВС на нагрузочном стенде,
- 4) Корректировка параметров работы ДВС и снятие итоговой мощности и крутящего момента

5) Выведение общих рекомендаций для проектирования впускного ресивера.

Практическая значимость работы: Результат работы позволяет применить данные, полученные в ходе анализа и расчета при изготовлении системы впуска воздуха для болида класса «Формула Студент».

Теоретическая значимость работы: Разработана модель впускной системы резонансного наддува для болида класса «Формула Студент», удовлетворяющая требованиям регламента.

Публикации: По теме диссертации опубликована одна печатная работа

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов и выводов. Объем диссертации составляет 75 страниц, включая 42 рисунка и 3 таблицы.

## 1 Состояние вопроса

Современные двигатели, имеющие систему впрыска, обладают наличием впускного ресивера. Следует понимать, что чем больше воздуха попадет в цилиндры двигателя, тем эффективнее происходит процесс горения топливовоздушной смеси, как итоговый результат — получение большей отдачи от двигателя в виде мощности и крутящего момента передаваемого на трансмиссию автомобиля. Однако существует много факторов способных снизить производительность двигателя по причине неправильно спроектированной системы впуска. Поэтому суть заключается в увеличении пропускной способности и тонкой настройки системы.

Основными задачами ресивера заключаются:

- Накопление сжатого воздуха между тактами,
- Хранение сжатого воздуха до открытия впускного клапана,
- Выравнивание и поддержание определенного уровня давления во впуске,
- Смягчает пульсации, которые возникают в ходе работы двигателя,
- Охлаждение проходящего воздушного потока,
- Задержка конденсата.

На КПД двигателя внутреннего сгорания сильное влияние оказывает количество поступившего воздуха, за такт впуска во время работы. Коэффициент наполнения отображает количество поступившего воздуха, в сравнении с возможно поступившем бы, при наличии приближенных показателей температуры и давления к атмосферным. В теории максимальный коэффициент наполнения зависит от степени сжатия  $\varepsilon$  и может быть выражен формулой:

$$\eta_v = 1,33 \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \quad (1)$$

Подача топливовоздушной смеси в камеру сгорания происходит на такте впуска, при условии, что двигатель четырехтактный. Подача происходит через впускные клапаны за счет разрежения в момент открытия клапана, затем происходит перекрытие канала до следующего такта впуска. Впускной ресивер обеспечивает необходимое количество воздуха на начало каждого такта впуска, что и позволяет добиться эффективной работы системы. Строго определенная форма и объем ресивера также оказывают влияние на корректность работы системы. Все эти параметры определяются на стадии проектирования, для эффективной работы определенного двигателя. Объем ресивера должен быть функцией рабочего объема двигателя – в общем случае 50-70% от объема двигателя. Место соединения впускных каналов и ресивера является значимым в конструкции. Форма раструба в этом месте позволяет добиться увеличения скорости воздуха на впуске. Такой параметр как длина впускных каналов позволяет менять распределение пикового крутящего момента по частоте вращения коленчатого вала. Увеличение длины патрубков обеспечивает прирост момента на низких оборотах, а укороченные — на средних и высоких. На данный момент времени TRT использует ресивер, напечатанный на 3D принтере. Он уступает карбоновому ресиверу – по весу и прочности, но превосходит по качеству внутренних полостей и геометрии (имеется постепенное увеличение диаметра после дроссельной заслонки для разгона воздуха). Так же впускные каналы имеют не оптимальную геометрию и длину, что сильно влияет на крутящий момент и может сделать его нестабильным, а также приводит к падению мощности. Имеется необходимость в смещении пикового крутящего момента и мощности к меньшей частоте вращения коленчатого вала. Хороший впускной ресивер должен иметь как можно более прямой путь для воздуха, плавные изгибы.

## 1.1 Особенности применения ресивера двигателя согласно регламенту Rules FSG

«CV 1.1.1 Двигатель(и), используемые в автомобиле, должны быть поршневыми с четырёхтактным циклом работы двигателя с объемом, не превышающим 710 см<sup>3</sup>. Гибридные трансмиссии, как например те, которые используют электродвигатели, работающие от источников энергии, запрещены.

### CV 1.3 Система забора воздуха

CV 1.3.1 Все элементы систем управления впуска воздуха и расхода топлива (включая дроссельную заслонку, полную систему впуска воздуха, воздушный фильтр и воздухопроводы), должны располагаться внутри поверхности, ограниченной вершиной дуги и внешними гранями четырёх шин. (См. рис.1).

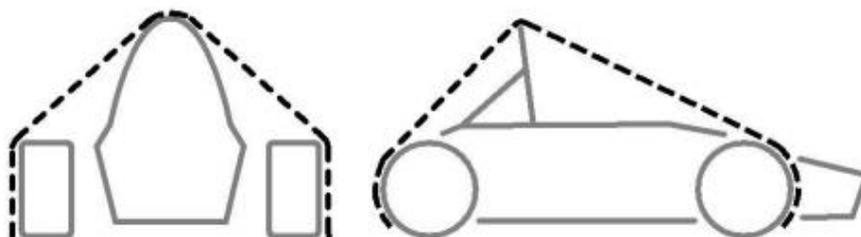


Рисунок 1 – Схема поверхности для расположения элементов впускной системы

CV 1.3.2 Любая часть системы впуска, расположенная ниже, чем 350 мм над поверхностью земли, должна быть ограждена от удара сбоку или сзади конструкцией, построенной, руководствуясь правилами пункта T 3.15.»  
[9]

«CV 1.3.3 Впускной коллектор должен быть надежно прикреплен к блоку двигателя или головке цилиндров скобами и механическими крепежами. Крепежные элементы с резьбовым соединением, используемые для закрепления впускного коллектора, считаются "критическими" и, следовательно, должны соответствовать требованиям T 10.

CV 1.3.4 Система впуска с большими габаритами или кронштейном от головки двигателя должны иметь опоры, чтобы предотвратить нагрузки на систему впуска. Подвеска двигателя должна быть жесткой. Опоры рамы или шасси должны иметь изоляцию, которая не будет мешать движению двигателя и перегибу шасси.

#### CV 1.4 Дроссель

CV 1.4.1 Автомобиль должен быть оборудован дроссельным узлом. Дроссельный узел может иметь любой размер или дизайн.

CV 1.4.2 Дроссель должен приводиться в движение механически, педалью, т. е. через трос или систему тяг, пункт CV 1.5 или же электронной системой дроссельной заслонки, пункт CV 1.6.

CV 1.4.3 Позиция дроссельной заслонки определяется процентом от хода от полностью закрытой до полностью открытой, где 0% - полностью закрытая и 100% - полностью открытая. Идеальной положение — это среднее положение во время работы двигателя на холостом ходе.

CV 1.4.4 Механизм системы дроссельной заслонки должен быть защищен от попадания мусора для избегания заклинивания.

#### CV 1.7 Впускная система, рестриктор

CV 1.7.1 Для ограничения мощности двигателя необходимо установить рестриктор в систему впуска воздуха; весь воздушный поток» [9]

«должен проходить через рестриктор. Допускается только следующее расположение элементов:

- В двигателях без наддува расположение указано на рис.16: дроссельная заслонка, рестриктор и двигатель.

- «• В двигателях с турбонаддувом или нагнетателем расположение указано на рис.17: рестриктор, компрессор, дроссельная заслонка, двигатель

CV 1.7.2 Максимальные диаметры рестриктора, которые сохраняются на протяжении всего соревнования: • Автомобилей на бензине - 20 мм • Автомобиля на топливе E-85 - 19 мм

CV 1.7.3 Рестриктор должен быть расположен таким образом, чтобы обеспечивалось легкое измерение в течение инспекционного процесса.

CV 1.7.4 Рестриктор не может быть подвижным или гибким, например, рестриктор не может быть подвижной частью дроссельного узла

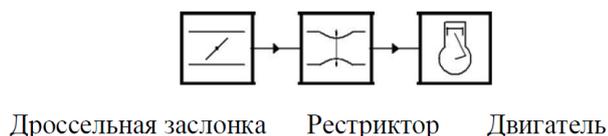


Рисунок 2 – Внутренняя конфигурация двигателя без наддува.

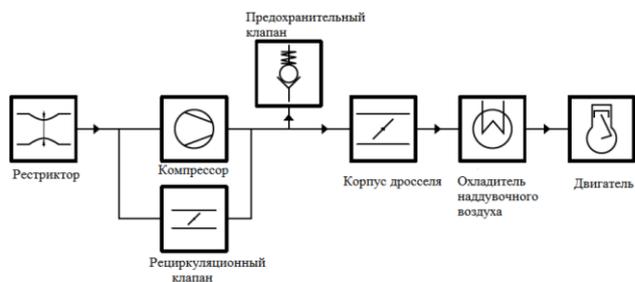


Рисунок 3 – Внутренняя конфигурация двигателя с турбонаддувом или нагнетателем» [9]

«Регламент Formula Student предполагает наличие рестриктора во впускном тракте, который создает дополнительное сопротивление воздуху. Это отрицательно влияет на мощность. Команды «Формула Студент» стремятся оптимизировать систему впуска двигателя для получения максимальной мощности и топливной эффективности.» [9]

## 1.2 Существующие подходы к проектированию и изготовлению ресиверов «Формула Студент»

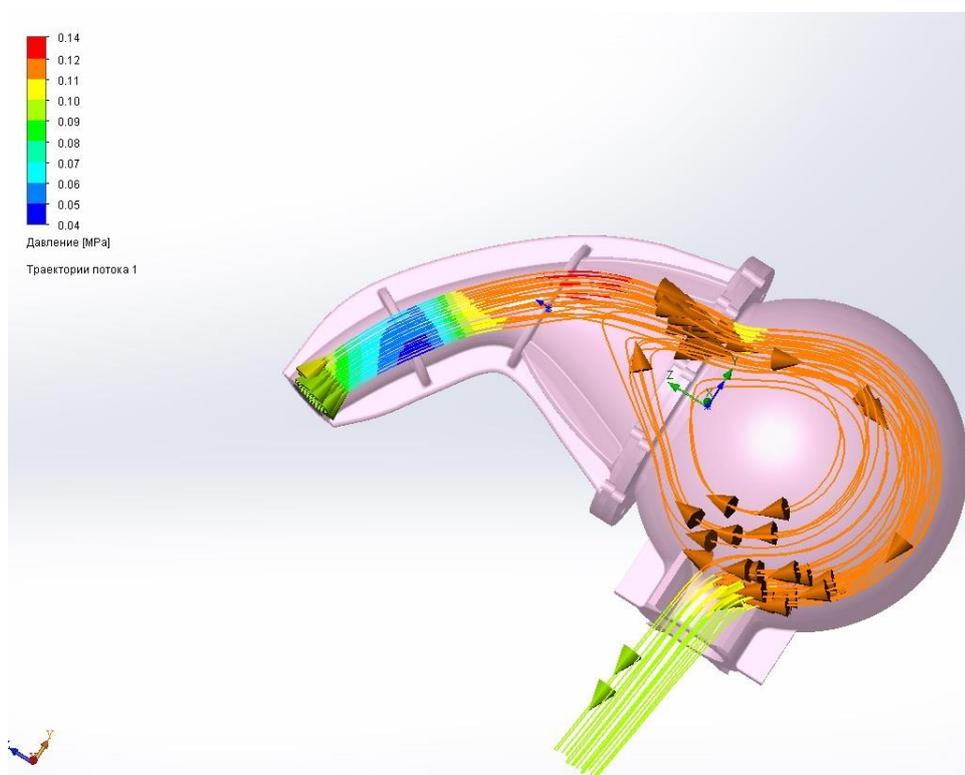


Рисунок 4 – Траектории давления потока в предыдущем ресивере

Предыдущая конструкция ресивера состоит из 2 частей, ресивера и коллектора. Материал пластик (изготовлен на 3D принтере) Объем ресивера 3л, что составляет примерно 4,3 объема двигателя. Впускной раннер имеет длину около 50 мм и не имеет раструба на входе. В конструкции довольно

большое расстояние от дроссельной заслонки до основного объема ресивера, что негативно влияет на забор воздуха.

Короткий раннер обеспечивает высокое наполнение на большей частоте вращения коленчатого вала, чем частота, соответствующая максимальной мощности, большой объем ресивера сглаживает пульсации потока, но дает низкую чувствительность на перемещение педали акселератора.



Рисунок 5 – Ресивер без банки (прямой)

Данный ресивер соответствует правилу о впускных коллекторах равной длины. Материал высокопрочный полимер. В таком ресивере отсутствует циркуляция воздуха внутри его объема, при такой концепции очень важно исключить какие-либо повороты. Так как воздух набрал высокую скорость в ресивере (около 100 км.ч.) и инерция у такого потока большая. Но данный ресивер будет приводить к потере мощности так как в конце такта впуска клапан перекрывает подачу, то воздух, который не успел пройти в камеру, продолжает давить на головку клапана. Под воздействием высокого давления воздух стремится вернуться в верхнюю часть ресивера помимо закрытия и открытия клапанов, воздух будет стремиться менять направление из-за явления резонанса, воздух пульсирует из стороны в сторону.



Рисунок 6 – Ресивер с банкой изготовленный на 3D принтере

Представленный ресивер также имеет коллекторы одной длины, что сказывается на правильности его работы. Сам ресивер изготовлен на 3D принтере из пластика, что снижает его вес, но влечет за собой потерю прочности (в зависимости от материала). Данный ресивер с «банкой» имеет некий резонанс этой самой «банки», что может менять характер наполнения на разных частотах вращения коленчатого вала двигателя. На входе такого ресивера воздух набирает большую скорость благодаря конусности. Наличие такой «банки» приводит к сглаживанию импульсов от закрытия и открытия впускного клапана. Принцип работы представленного ресивера в заполнении «банки» ресивера воздухом, где он, замедляясь с помощью импульсов всасывается в двигатель.

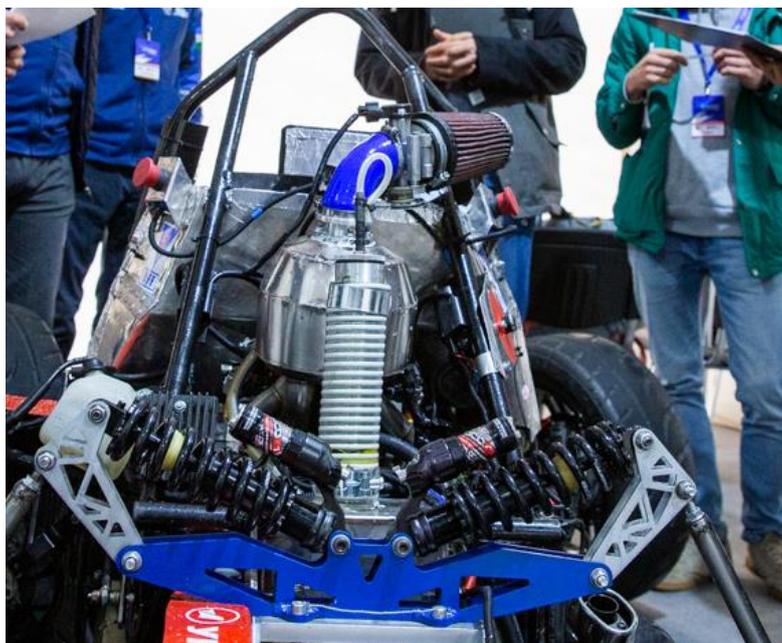


Рисунок 7 – Ресивер из алюминия с банкой

Данный ресивер имеет «банку» примерно объемом около 3 литров. Конструкция ресивера не очень удачная воздух будет иметь завихрения и сильно терять скорость упираясь в нижнюю часть «банки» ресивера, а также иметь эффект турбулентности в местах сварки. Такой ресивер из алюминия имеет большой вес, что нецелесообразно в соревнованиях формула студент, так как команды борются за максимальное снижение веса болида.

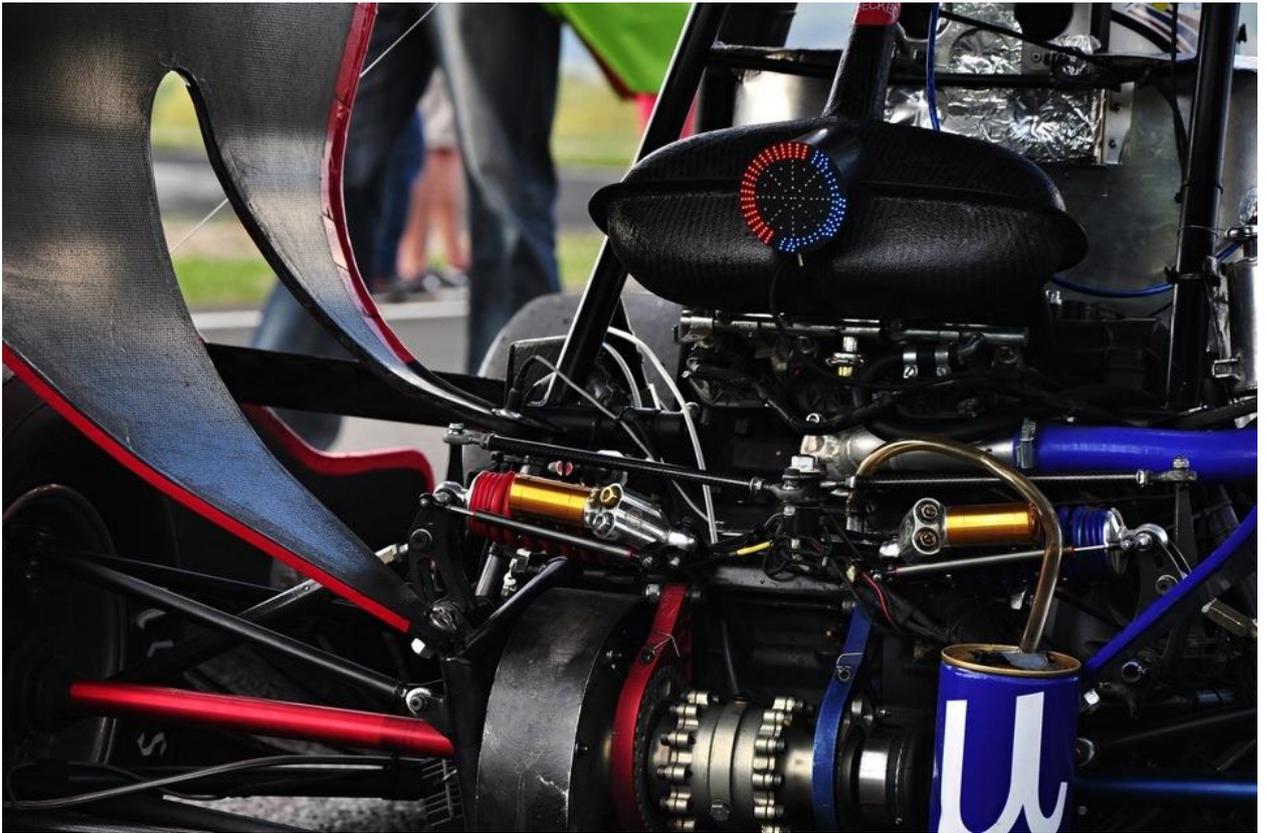


Рисунок 8 – Ресивер изготовленный из углеволокна с «банкой»

Данный ресивер имеет «банку» примерно объемом около 1,5 литра. Изготовлен из углеволокна, при помощи вакуумной формовки, имеет малый вес. Коллекторы имеют малую длину, обеспечит пиковый крутящий момент на средней и низкой частоте вращения коленчатого вала. На входе такого ресивера воздух набирает не большую скорость так как воздух разгоняется только в корпусе дроссельной заслонки. Данный ресивер будет обеспечивать хорошую чувствительность на перемещение педали акселератора так как объем ресивера около 2,1 объема двигателя.



Рисунок 9 – Ресивер изготовленный из алюминия

Данный ресивер имеет коллекторы одной длины, что является плюсом. Объем данного примерно около 1,3 литра, что обеспечит хорошую чувствительность на перемещение педали акселератора, но будет проигрывать на высоких оборотах из-за неуспеваемости наполнения ресивера. Воздух, проходящий внутри ресивера в местах сварки, будет замедляться иметь завихрения, так как с внутренней стороны шва поверхность не гладкая.

### 1.3 Выводы

Рост коэффициента наполнения будет влиять на увеличение давления в конце такта впуска, увеличению КПД двигателя, улучшит смесеобразование. Добиться можно за счет снижения до минимума сопротивления во впускной системе, а также при помощи равномерного распределение воздуха для двигателей с несколькими цилиндрами. Такие факторы как шероховатость каналов, мгновенных изменений направления потока и мгновенных расширений и сужений диаметров канала увеличивают сопротивление. Поскольку в конструкции очень важно соблюдать точность, пристальное

внимание уделяется впускным каналам. Патрубки должны иметь точные параметры длины и формы, недопустимым считается искривления и углы.

Основные причины:

- оседание топлива на стенках;
- резонанс Гельмгольца;
- расчет давления для работы системы.

Первая причина проста, ведь топливо при острых углах и выступах будет лишь оседать на них. Это в будущем может привести к засорам и сужению канала, поэтому важно избегать таких недостатков. Вторая причина – частая проблема у конструкторов. Резонансом Гельмгольца называется противодействие воздушного потока. Когда впускной клапан открывается, то смесь движется по патрубкам к цилиндру. В момент его закрытия поток прекращается, но инерция не исчезает. В результате смесь давит на клапан, формируя высокое давление в данной области. Этим же давлением она выталкивается назад, создавая противодействие при следующем впуске. В результате технические характеристики коллектора существенно ухудшаются, а многие элементы подвергаются повышенному износу. Последняя же причина – расчет давления для работы системы. Если длина патрубков будет излишне велика, то системе придется возмещать давление в этой области для нормального движения топлива, что приводит к дополнительному износу системы.

Различные виды надува оказывают большое влияние на наполнение камеры сгорания. В случае TRT используется метод динамики поступающего воздуха, имеющего название динамический и резонансный. Эффект заключается, что на такте впуска по каналам впуска расходуется волна разрежения. Эти волновые явления генерируются во впускных трактах благодаря циклическому поступлению воздуха в цилиндры двигателя, обеспечивая эффект в узком диапазоне работы двигателя. Энергия колебаний используется для увеличения наполнения на определенных расчетных резонансных частотах. Суммарная волна разрежения большой

амплитуды, наблюдаемая во впускном патрубке перед клапаном, сменяется вблизи НМТ волной давления, вследствие чего увеличивается наполнение цилиндра после НМТ, и коэффициент наполнения может превысить единицу. [9]

Факторами влияющими на выбор материала являются, опыт предыдущих ресиверов и анализ ресиверов команд формулы студент, необходимо найти золотую середину между большим весом ресивера из алюминия и имеющем шероховатости в местах сварки, либо легким не менее прочным ресивером из карбона с возможными минимальными неровностями полостей, или же ресивера напечатанного на 3D принтере имеющим гладкие внутренние поверхности, но уступающему по прочности двум выше упомянутым при использовании abs пластика. В случае использования высокопрочных полимеров для печати, прочность будет соответствовать необходимой, но вес будет излишним.

Проведя анализ принято использовать ресивер из углеволокна. Так как он имеет выигрыш по весу в сравнение с алюминиевым и пластиковым ресиверами в случае печати из высокопрочных полимеров, а по прочности не уступает ресиверам изготовленных из вышесказанных материалов. Объем ресивера составляет 3,1 литра.

## **2 Теоретические основы зависимости длины раннера, динамические характеристики ДВС от геометрических параметров ресивера**

«Переменная геометрия может создать благоприятный воздушный вихревой поток или турбулентность в камере сгорания. Закручивание помогает распределить топливо и образовать однородную топливовоздушную смесь — это помогает инициировать процесс горения и способствует полному сгоранию. При низких оборотах в минуту скорость воздушного потока увеличивается, путем направления воздуха через более длинный путь с ограниченной площадью поперечного сечения - и это способствует улучшению крутящего момента при низких частотах вращения коленчатого вала. При высоких частотах вращения более короткий и большой воздухопровод открывается при увеличении нагрузки, так что в камеру может поступать большее количество воздуха с наименьшим сопротивлением — это помогает увеличить максимальную мощность. В конструкциях с двойным верхним распределительным валом (DOHC) воздушные пути могут иногда соединяться с отдельными впускными клапанами, поэтому более короткий путь можно исключить, дезактивируя сам впускной клапан.

Известными системами впуска переменного сечения являются:

- Intake Manifold Runner Control, IMRC, Charge Motion Control Valve, CMCV от Ford;
- Twin Port от Opel;
- Variable Intake System, VIS от Toyota;
- Variable Induction System, VIS от Volvo» [1]

Пример системы впуска переменного сечения приведен на рисунке 10



Рисунок 10 – Система впуска переменного сечения

1 – работа системы при полной нагрузке (заслонка открыта), 2 – работа системы при частичной нагрузке (заслонка закрыта, завихрения топливовоздушной смеси), 3 – вихревой канал, 4 – вакуумный регулятор заслонки, 5 – форсунка, 6 – заслонка, 7 – канал наполнения [3].

«Переменный впускной коллектор был популярен на атмосферных двигателях с середины 1990-х годов. Он в основном используется для расширения полки крутящего момента, для повышения эластичности двигателя. Обычный настраиваемый впускной коллектор фокусируется на узком диапазоне оборотов. Переменный коллектор, напротив, предлагает два или более этапов конфигурации наполнения для работы с разными частотами вращения коленчатого вала. Это очень похоже на изменение фаз газораспределения, но коллектор с переменной длиной, как правило, дешевле производить, поскольку он включает только некоторые литые или» [4].

«пластиковые коллекторы и несколько клапанов с электрическим приводом. Это объясняет, почему эта технология была применена к более дешевым и более мелким двигателям задолго до того, как системы с изменяемыми фазами стали популярными. Сегодня многие двигатели используют обе функции для достижения наилучших результатов. Поскольку сейчас прослеживается тенденция к производству автомобилей с турбонаддувом, ожидается снижение популярности применения впускных трактов с переменной длиной [11].

Впускной коллектор переменной длины является прямым ответом на недостаток обычного настроенного впускного коллектора. Если впускной коллектор с фиксированной длиной оптимизирован для очень узкого диапазона оборотов, почему бы не использовать два впускных тракта, один с короткими трубами для получения преимущества на высоких оборотах, а другой с длинными трубами - низких оборотов? Для переключения между длинными и короткими трубопроводами используются простые заслонки.

В реальном цикле работы двигателя внутреннего сгорания смена фаз происходит не в мертвых точках, а с некоторым угловым отклонением относительно них. Круговая диаграмма, иллюстрирующая чередование фаз газораспределения, приведена на рисунке 11.» [4]

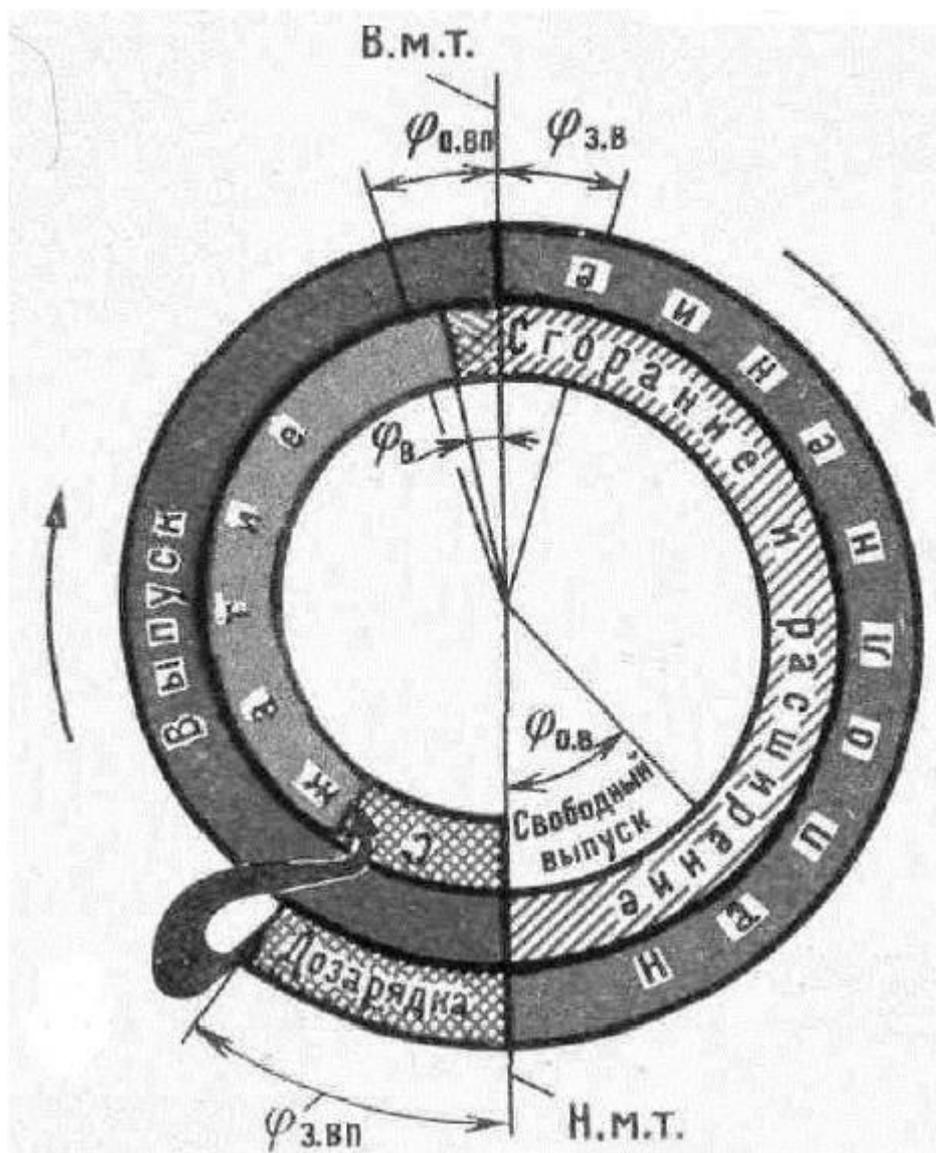


Рисунок 11 – Фазы газораспределения четырехтактного двигателя [4]

«Впускной клапан открывается с некоторым опережением на угол  $\varphi_{0.вп}$  до ВМТ. Воздушно-топливная смесь всасывается в цилиндр двигателя. Процесс впуска завершается после прохождения поршнем НМТ с запаздыванием на угол  $\varphi_{0.вп}$ . Процесс выпуска таким же образом смещен относительно мертвых точек. Впускной клапан открывается до НМТ с» [4]



«характеризует равновесное состояние газа. Реальные же процессы не являются равновесными, из-за движения поршня, наличия волновых процессов, а также взаимодействия относительно холодной свежей порции с продуктами сгорания, которые обладают высокой температурой. Однако, в большинстве случаев указанными отклонениями пренебрегают. Также влияние оказывают условия граничных условий цилиндра. Параметры газа в каналах впуска и выпуска непостоянны по причине непостоянности течения потока, при расчетах давление принимают постоянным.

На рисунке 13 представлен двигатель компании KTM, модель LC4. Данный двигатель используется командой Формула Студент ТГУ Togliatti Racing Team. Этот двигатель устанавливается на мотоциклы KTM 690 Duke, KTM 690 SMC и другие. Как видно в составе системы впуска серийного двигателя отсутствует ресивер, а впускной трубопровод имеет короткую длину. Для использования его на болиде требуется провести разработку газоздушного тракта, включающего в себя ограничитель воздуха – рестриктор.» [1]



Рисунок 13 – Двигатель KTM LC4 [28]

Исходные данные для расчета:

- Степень сжатия двигателя  $\varepsilon$ : 11,8.
- Частота вращения коленчатого вала двигателя  $n$ , об/мин 6500
- Количество цилиндров,  $i - 1$ .
- Рабочий объем цилиндра двигателя  $V_h$ , литр 0,654
- Время-сечение впускных клапанов  $A$ , мм<sup>2</sup>\*с 4,22
- Количество остаточных газов  $\alpha$  0,035

Определение критериев подобия:

- температура окружающей среды при нормальных условиях  $T_0$ , С 293
- универсальная газовая постоянная  $R$  287
- показатель политропы сжатия для воздуха  $k$  1,4
- скорость звука при нормальных условиях, м/с

$$a_s = \sqrt{kRT_0} = 343,114 \text{ м/с}, \quad (2)$$

Определим частоту вынужденных колебаний,  $f$

- Порядок гармоники  $r = 1$
- Коэффициент тактности двигателя  $\tau = 2$

$$f = \frac{nr}{\tau 60} = 54,176 \text{ Гц}, \quad (3)$$

Определим критерий, характеризующий среднюю скорость течения во впускном клапане

$$\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon} \times \frac{d^2 \times a_s}{V_h \times f} = 26 \text{ м/с}, \quad (4)$$

Отсюда определим диаметр трубопровода

$$d = \frac{V_h \times 10^{-3} \times f \times \varepsilon \times 26}{a_s \times \varepsilon - 1} = 0,054 \text{ м}, \quad (5)$$

Таким образом диаметр впускного трубопровода будет равен  $d=0,054\text{м}$

Определим эффективную длину трубопровода Длину впускного трубопровода можно определить по критерию, который характеризуется числом Струхалия:

$$S_h = \frac{L_f}{a_s}, \quad (6)$$

Значение числа Струхалия определим по соответствующей зависимости и по критерию  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \times \frac{A \times a_s}{V_h 1000}$  Отсюда длина трубопровода будет равна:

$$L = \frac{S_h \times a_s}{f} = 0,250 \text{ м}, \quad (7)$$

По результатам расчета получены следующие значения: диаметр впускного трубопровода  $0,054 \text{ м}$ ; длина впускного трубопровода  $0,304 \text{ м}$ . Определим коэффициент наполнения при данных значениях диаметра и длины впускного трубопровода двигателя. При заданных исходных параметрах и полученных диаметра и длины впускного трубопровода критерий  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \times n_v$  будет равен  $0.89$ . Отсюда коэффициент наполнения равен:

$$n_v = \frac{0,9 \times \varepsilon}{\varepsilon - 1} = 0,972 \text{ (90,7\%)}. \quad (8)$$

Эффект динамического наддува существенно зависит от точности настройки на определенный скоростной режим. Волновые эффекты, на которых основан динамический наддув, могут влиять на коэффициент наполнения отрицательно, т. е. на некоторых режимах работы двигателя могут наблюдаться провалы. Поэтому появляется необходимость определения и на других расчетных режимах работы ДВС. Результаты, полученные при расчете представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициента наполнения

$n, \text{мин}^{-1}$	$S_h$	$\gamma_0$	$n_v$
1500	0,011	0,031	0,918
3600	0,026	0,032	0,929
6500	0,046	0,035	0,972
7000	0,05	0,038	0,961

По соответствующим значениям числа Струхаля, и заданным начальным параметрам определим  $n_v$  по критерию  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \times n_v = K_{ГВТ}$ . В таблице 2 приведены значения  $K_{ГВТ}$  для некоторых двигателей.

Таблица 2 – Значения  $K_{ГВТ}$  для некоторых двигателей

Марка двигателя	Гоночный NSU	ВАЗ-2103	М-412	ГАЗ-24	Лотос-1500
$K_{ГВТ}$	0,896	0,6	0,6	0,54	0,632

Таким образом оптимальная длина раннера для двигателя с рестрикром составляет 250 мм. Это длина включает в себя длину порта внутри гбц, втулка-переходник с гбц на ресивер и впускной патрубков ресивера. Зная, что длина от впускного клапана до начала впускного патрубка составляет 150мм, выбираем длину раннера 100мм.

## **2.1 Анализ влияния объема и формы ресивера на мощность и крутящий момент ДВС**

Впускные каналы — это части системы впуска воздуха, которые подают воздух из впускного коллектора в цилиндры. В каждом канале доминирующим явлением, которое управляет его исполнением, на самом деле является эффект акустических волн. Поскольку целью каналов является подача воздуха, его производительность зависит от количества воздуха, которое он может доставить, а в случае с двигателем - последующего повышения объемного КПД [3]. Впускной ресивер представляет собой резервуар, из которого воздух поступает в цилиндры двигателя. Этот воздух, в свою очередь, пополняется из атмосферы через дроссельную заслонку. В системе впуска, снабжающей два или более цилиндра, и особенно один с системой с ограниченным всасыванием, как и в машине FSAE, важно, чтобы существовал коллектор, который способен снабжать воздухопроводы достаточным потоком воздуха. Коллектор также стремится уменьшить влияние несбалансированного распределения на отдельные цилиндры, в некоторых случаях геометрически асимметричные, создавая градиент давления над входом в каждую направляющую цилиндра, так что объем воздуха, поступающего в каждый цилиндр, может быть последовательным [3]. Рассмотрены варианты конструкций системы впуска для болида «Формула Студент». Приводится описание впускного тракта с единым объемом ресивера и ресивера с двойным объёмом. Оба варианта имеют свои преимущества и недостатки, основным решающим фактором для выбора одной из этих конструкций является концепция, с применением резонансной зарядки. На эффект резонансной зарядки оказывает влияние следующие параметры: частота вращения коленчатого вала, длина впускного трубопровода, объем ресивера, диаметр трубопровода. Изменяя один из параметров до подходящего значения, резонансная зарядка может быть

достигнута путем синхронизации волны давления с открытым клапаном. Ресивер с двойным объемом. Как следует из названия, ресивер делится на две половины, одна половина подает воздух к центральным цилиндрам, а другая – к двум внешним цилиндрами. Разделенные ресиверы обычно, улучшают среднечастотный крутящий момент. Одним из явлений, происходящих в таких ресиверах, является преимущество объемной резонансной зарядки. Вместо одного большого резонатора, резонирующего в зависимости от частоты вращения коленчатого вала, могут быть настроены двойные камеры, где положительный резонанс в одной из частей помогает всасыванию заряда в трубопровод другого объема.



Рисунок 14 – Внутренне сечение ресивера с двойным объемом

Такая концепция разделения ресивера может показаться идеальной для ограниченных двигателей, но правильное сбалансированное приложение вряд ли будет достигнуто из-за геометрических ограничений. Внутренние цилиндры потребляют воздух, создавая голодание у внешних, из-за неуравновешенного резонанса. Это приводит к сжиганию прогоранию поршней, и выходу двигателя из строя [21].

Для повышения эластичности работы двигателя, для улучшения реакции на изменения положения педали акселератора во время ускорений и замедлений транспортного средства, была разработана инновационная система впуска, состоящая из канала переменной длины (рисунок 2.6). Использовалась калиброванная численная модель, которая объединяет двигатель и транспортное средство и позволяет имитировать как стационарные, так и переходные условия. Канал переменной длины не задействует ресивер, когда максимальная мощность не требуется.

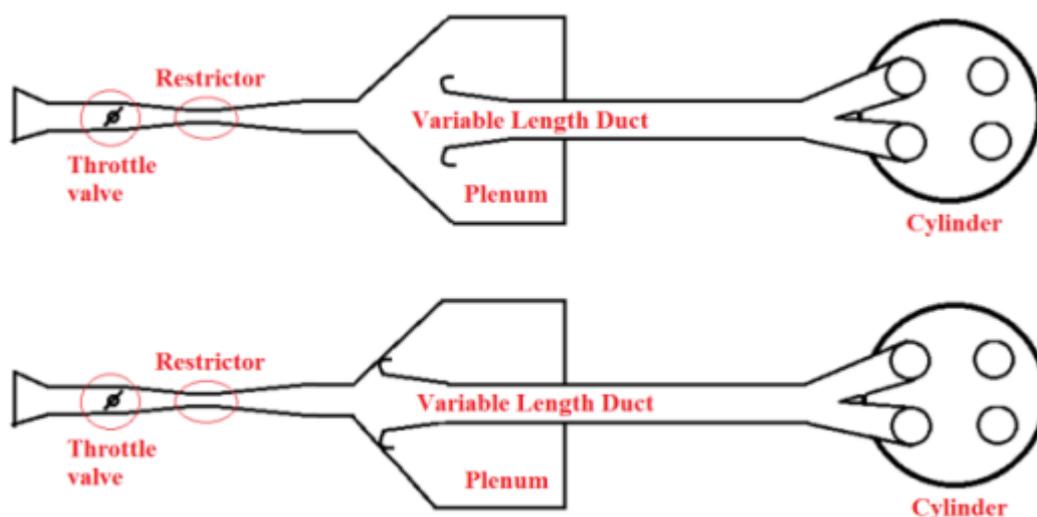


Рисунок 15 – Конструкция впускной системы переменной длины [22]

Предварительная управляющая логика системы основана как на открытии дроссельной заслонки, так и на угловой скорости вращения коленчатого вала. Моделирование в стационарных и переходных условиях показало, что целесообразно исключить камеру повышенного давления из линии всасывания как при низких оборотах двигателя, так и при открытии дроссельной заслонки менее 60%. И наоборот, ресивер должен быть использован для достижения высокой мощности. Результаты численной деятельности показывают, как система переменной геометрии не влияет на максимальную мощность двигателя, полученную с помощью камеры повышенного давления, и в то же время позволяет добиться значительного улучшения с точки зрения ускорения и замедления транспортного средства.

Engine Analyzer Pro — это комплексный пакет программного обеспечения для профессионального моторостроителя или инженера для имитации работы двигателя. Engine Analyzer Pro позволяет пробовать различные модификации частей двигателя и посмотреть, как они влияют на крутящий момент, лошадиные силы, расход воздуха, расход топлива и так далее. [10]



Рисунок 16 – Воспроизведение стандартных характеристик двигателя в EAP.

Пиковый крутящий момент 70 Нм на частоте вращения коленчатого вала равного 6500 об/мин, мощность 64 л.с. при 7000 об/мин.

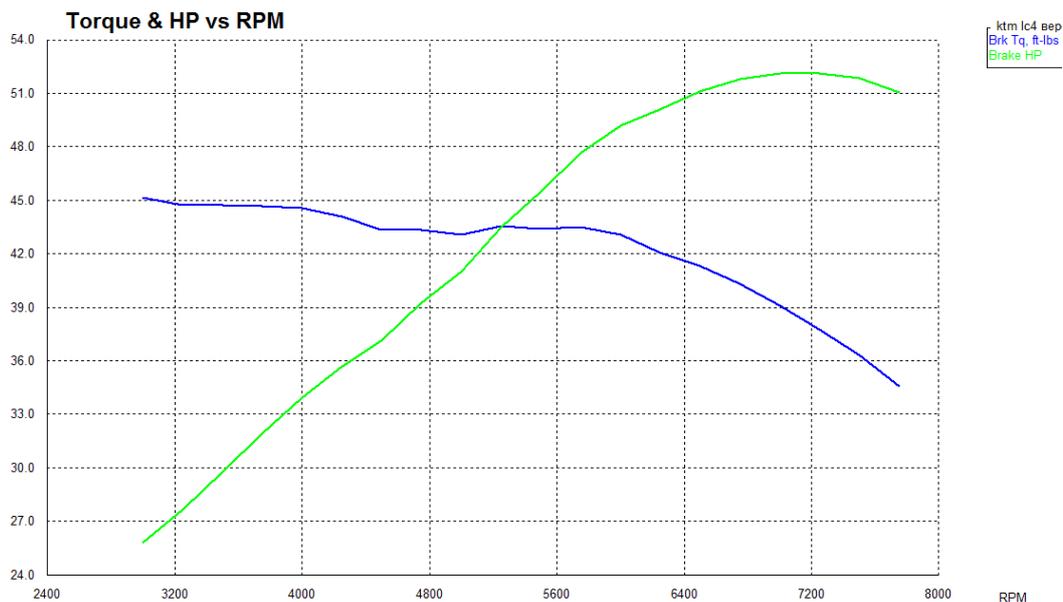


Рисунок 17 – Воспроизведение двигателя: рестриктор 20 мм, раннер 100 мм  
объем ресивера 2.5л в ЕАР

Изначально был смоделирован стандартный двигатель с заводской впускной системой для сравнения с заводским графиком мощности. Погрешность составляла меньше 5%.

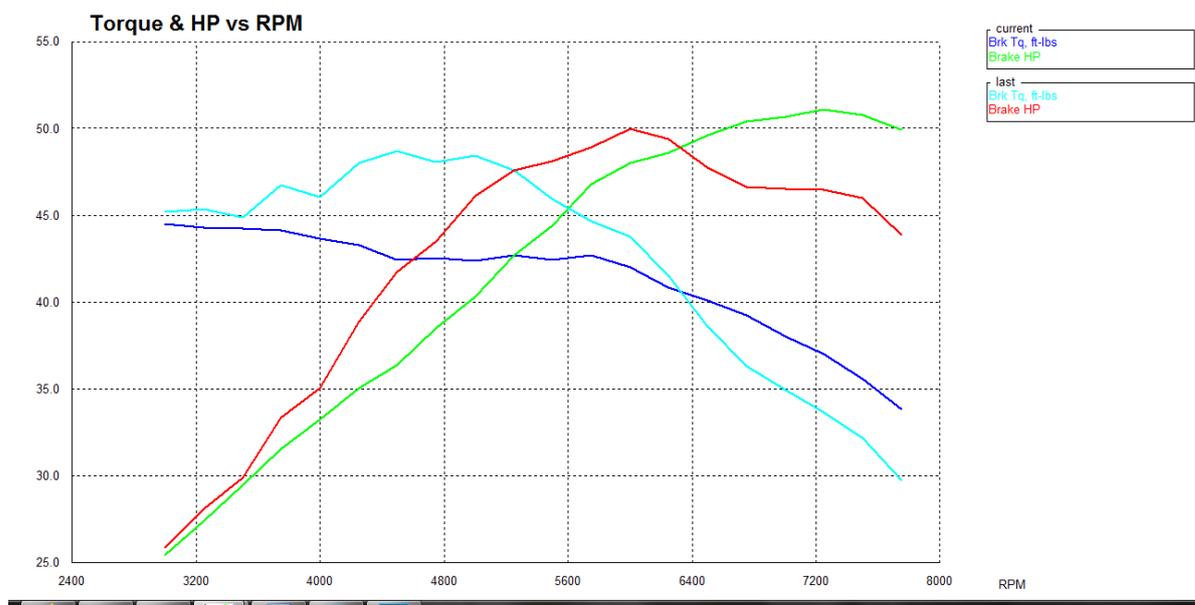


Рисунок 18 – Сравнение впускных систем с длиной раннера 100 мм и 250 мм

При использовании слишком длинного раннера максимальный крутящий момент смещается в зону меньших оборотов коленчатого вала тем самым мы будем иметь на оборотах 3100 крутящий момент около 45 Нм (синяя линия), а мощность будет достигаться к 7200 около 51 л.с (зеленая линия). При использовании слишком короткого раннера максимальный крутящий момент смещается в сторону высоких оборотов на 4500 крутящий будет достигать 47 Nm, в то время как максимальная мощность будет около 6000 оборотов и равна будет 50 л.с, ограниченных рестриктором.

На трассе формулы студент, которая спроектирована на основе картинговых треков, важна приемистость двигателя, на дисциплине «Автокросс» прямые участки достигают 80 метров, что является небольшим расстоянием для разгона автомобиля, но необходимым для общего сокращения времени на прохождение данной дисциплины, наличие зигзагов и до пары поворотов друг за другом, что значительно затормаживает автомобиль, однако в дисциплине «Ускорение» важна максимальная мощность, так как общая длинна прямика для разгона 75 метров, где можно получить не мало важное количество баллов.

## 2.2 Анализ влияния конструктивных особенностей ресивера на значение эффективной частоты вращения коленчатого вала

С повышением частоты вращения коленчатого вала сопротивление впускной системы возрастает пропорционально квадрату частоты вращения. Поэтому давление  $p_a$  в цилиндре в конце наполнения снижается. Понижение  $p_a$  при малых частотах вращения коленчатого вала происходит из-за обратного выброса во впускную систему вследствие запаздывания закрытия впускного клапана (выброс тем больше, чем меньше частота вращения коленчатого вала). Одной из важных задач ресивера является разогнать воздух на пути к камере сгорания. Увеличение скорости проходящего воздуха, в разумных пределах, положительно сказывается на обеспечении высокой турбулентности топливовоздушной смеси, обеспечивая наилучшее горение смеси. При этом улучшается наполнение камеры сгорания, что позволяет получить большую мощность с того же механической части в ДВС.

При симметричной компоновке впускного коллектора повышается вероятность равномерного распределения топливовоздушной смеси по цилиндрам двигателя, по сравнению с более компактным, но несимметричным коллектором. Также длина каналов ресивера оказывает сильное влияние на количество воздуха попадающего в камеру сгорания во время такта впуска, для двигателей, не использующих нагнетатель. Следует понимать, что двигатели, работающие на более высоких оборотах (свыше 2700 — 3000 об/мин) имеют необходимость в коротких и более прямых впускных каналах, и наоборот для двигателей, имеющих низкие рабочие обороты и крутящим моментом приблизительно в среднем диапазоне оборотов требуют наличие длинных впускных каналов. Компоновка для TRT предусматривает смесеобразование в каналах ГБЦ, конструкция патрубков может быть любой. Данная конструкция позволяет избежать такого эффекта

резонанс Гельмгольца. Поток топливовоздушной смеси при открытии впускного клапана начинает движение ровно по каналу ресивера в сторону камеры сгорания. В момент, когда клапан закрывается, воздух, который не успел попасть в цилиндр двигателя, продолжает давить на впускной клапан. Из-за наличия высокого давления воздух начинает подниматься в верхнюю часть ресивера. В итоге приводит к образованию противотоков во впускном канале. При следующем открытии клапана, когда происходит смена направления потоков воздуха, наблюдается очень высокая скорость. По результатам исследований данный поток может достигать приближение к сверхзвуковой скорости. Помимо влияния работы клапана, воздух будет стремиться менять направление так как эффект резонанса неизбежен. Колебание воздуха из стороны в сторону приводит к снижению эффективной частоты вращения коленчатого вала.

Для любых двигателей, имеющих систему впрыска топлива обязательным, является наличие ресивера (за исключением использования прямого много дроссельного впуска). Объём ресивера необходимо рассчитывать исходя из объема двигателя – для общих случаев это цифра колеблется 50 до 70% от объёма двигателя. Важным моментом является конструкция коллектора в месте пересечения впускных каналов и самого ресивера. Данное пересечение желательно выполнять в форму раструба, что является идеальной формой канала для впуска воздуха.

Меняя длину впускных каналов ресивера, приводит к изменениям распределения пикового крутящего момента по оборотам двигателя, увеличивая длину патрубков мы получим прирост момента на низких оборотах, в то время как патрубки меньшей длины обеспечат увеличение пикового крутящего момента на средних и высоких оборотах двигателя.

Итогом работы впускного ресивера является увеличение подаваемого воздуха в камеру сгорания в момент такта впуска.

## 2.3 Топливная эффективность теоретические зависимости

Давление на такте впуска в жизни всегда оказывается ниже атмосферного, причинами являются шероховатость поверхностей системы впуска, повороты, точность изготовления клапанов и сопрягаемой поверхности с клапаном, а также нагрев самой смеси от деталей двигателя. Смесь, содержащая в себе большее количество топлива, именуется богатой. Однако работа двигателя на такой смеси не экономична, отсутствие достаточного количества воздуха приводит к выводу части топлива наружу в виде сажи. Для примера работа двигателя на спирте повышает коэффициент наполнения на 10%. Увеличение степени сжатия также приводит к росту производительности двигателя, а также снижению расхода топлива, за счет повышения рабочего давления в цилиндре. Для получения большей отдачи от топлива, необходимо воспламенить топливовоздушную смесь ранее точки ВМТ, но в разумных пределах. Топливная эффективность — это форма теплового КПД, отображающая какое количество топливовоздушной смеси, полезно сгорает преобразуясь в тепло и кинетическую энергию, а какое топливо идет в выхлоп в виде паров топлива или продуктов горения. КПД двигателя делится на два значения термодинамического и механического, первая отображает какая часть выделяемого тепла превращается в полезную работу, а вторая сколько полезной работы тратиться в пустую на преодоление механических сопротивлений в двигателе. В транспортной отрасли экономия топлива понимается как эффективность рассматриваемого транспортного средства, построенная на отношении пройденного пути на единицу затраченного топлива. Это зависит от таких факторов как: КПД двигателя, конструкцию трансмиссии и типу шин. Большинство стран, пользуются метрической системой экономии топлива указывая как «расход топлива» в литрах на 100 километров. За счет снижения коэффициента трение в КПП, двигателе внутреннего сгорания, редукторов, ступичных подшипников, можно снизить потери на трение максимум на 5-7 %, как

показывает практика это значение ближе к 5 %. Исходя из расчётов катализаторов для автомобилей можно понимать, что современные двигатели используют не более 75% топлива, а 25% выводится с отработавшими газами, которые принимает на себя катализатор. На сегодняшний день ДВС в среднем имеет КПД (термический) около 40%, а около 60% используется в пустую выходя через систему охлаждения и отработавшими газами. КПД (механический) имеет значение около 10 % на потери трения в самом ДВС, а также во вспомогательных механизмах. Эффективная мощность может быть выражена формулой:

$$N_e = \frac{p_e v_s n i}{900} \quad (9)$$

Таким образом общее КПД современного ДВС не более 30%. Существенным недостатком в ДВС является нехватка кислорода для горения топливовоздушной смеси в камере сгорания, а также в недостатке времени на моменте расширения газов. Принято понимать, что мощный и экономичный двигатель должен иметь высокую степень сжатия. Но по итогу это верно лишь на половину. При большой степени сжатия поршень имеет большой рабочий ход в цилиндре, что приводит к большой угловой скорости поршня на высоких оборотах двигателя. Приводя к большим инерционным разнонаправленным нагрузкам, оказывающих влияния на кривошипно-шатунный механизм двигателя. Итогом можно считать, что для двигателя с большой степенью сжатия необходимо наличие большой прочности всех нагруженных деталей, что приводит к их значительному увеличению веса. Также необходимо понимать, повышение степени сжатия провоцирует детонацию, которая приводит к всем вытекающим разрушительным изменениям в двигателе. Тем самым имея бензин с низким октановым числом попросту можно разрушить данный двигатель.

Однако достижение предельных реализуемых степеней сжатия теряет свой смысл. Поскольку термический КПД растёт с повышением степени

сжатия с постепенным замедлением. Тем самым имеет смысл увеличивать степень сжатия до определённого момента, так как все, что будет свыше окажет только отрицательный эффект как на ресурс двигателя, так и увеличение стоимости производства такого ДВС.

Важным для экономии топлива является большой рабочий ход поршневой группы, чтобы использовать максимально давление от сгоревшего топлива. А это длина хода сжатия, что является одной и той же. Так называемый ход расширения как влияющая величина на экономичность и эффективность желательно сделать максимально большим.

Одним из важных параметров для экономичности также считается эффективность сгоревшей топливовоздушной смеси. Исходя из теории процессов сгорания качество и скорость будет зависеть от температуры горения, и как итог в меньшей зависимости от давления, иными словами, при получении высокой температуры сгорания полноценность сгорания будет наибольшей, соответственно необходимость в высоком давлении уйдет сама собой. Как итог мощные двигатели работают на большой степени сжатия, но даже при таких условиях не могут преодолеть отметку КПД в 40%.

## **2.4 Выводы**

Из расчётов длины ранера мы понимаем, что оптимальная длина ранера для двигателя с рестриктором составляет 250 мм. Это длина включает в себя длину порта внутри гбц, втулка-переходник с гбц на ресивер и впускной патрубков ресивера. Зная, что длина от впускного клапана до начала впускного патрубка составляет 150мм, выбираем длину ранера 100 мм. Данная длина ранера обеспечит нам хороший крутящий момент (около 45 Нм на 3100 оборотах коленчатого вала), иными словами, с малых частот вращения коленчатого вала будет доступен весь потенциал двигателя, что благотворно повлияет на динамику автомобиля на прямых участках трассы.

Также для соревнований «Формула Студент» является очень важным топливная эффективность, «Гонка на выносливость» эта дисциплина представляет собой заезд общей длиной 22 км с использованием 2-х пилотов, также прямые не более 80 метров, зигзаги, большое количество поворотов идущих друг за другом, сильно затормаживая автомобиль, исходя из чего требуется постоянный разгон автомобиля, по окончании данной дисциплины производится замер израсходованного топлива, за который можно получить максимально 100 баллов. Это было одним из факторов выбора одноцилиндрового двигателя от KTM, который способен обеспечить минимальный расход топлива (расход около 1,9 литра на 22 км), без значительной потери мощности, достаточной для динамичного прохождения соревнований. В ходе проектирования впускной системы было уделено особое внимание исключениям резких поворотов, внезапных расширений, а также сужений как для увеличения коэффициента наполнения, так и роста пропускной способности системы.

### 3 Разработка технологического обеспечения исследований влияния конструкции ресивера на динамические характеристики ДВС

#### 3.1 Подбор технологической оснастки и изготовление ресивера



Рисунок 19 – Матрица части ресивера

Матрица для изготовления ресивера выполнена из фанеры, вырезанной на ЧПУ станке, для придания основной формы ресиверу, а также для гладких внутренних поверхностей впускного ресивера, полости между фанерами были заполнены шпатлевкой, так как шпатлевка быстро заполняет поры, а также легко поддается обработке и сохраняет форму. Опыт использования вместо шпатлёвки строительной пены, проявил себя с худшей стороны, а именно деформацией самой пены и потери необходимой формы в полостях между фанерой в процессе вакуумной формовки. Матрица сверху покрыта

виниловой пленкой. Которая необходима для улучшения отсоединения матрицы от готовой детали. При изготовлении самого корпуса ресивера применяется углеволокно, пропитывается эпоксидной смолой, и используется метод вакуумной формовки. Данный метод позволяет достигать точность изготовления и прилегание пропитанного волокна по всей поверхности технологической оснастки.



Рисунок 20 – Промежуточный вариант корпуса ресивера

На фото представлен промежуточный вариант корпуса впускного ресивера после склеивания двух его частей. В ходе изготовления частей корпуса на матрице, был заложен фланец для склеивания двух частей между собой, фланец для склеивания с второй частью корпуса ресивера, а также фланец для крепления корпуса дроссельной заслонки. Метод вакуумной формовки обеспечивает малый вес за счет использования необходимого количества эпоксидной смолы, отводя излишки в специальный резервуар, а также прочность изготовленным деталям.



Рисунок 21 – Матрица для второй части корпуса ресивера

Матрица второй части ресивера также изготовлена из фанеры, вырезанной на ЧПУ станке, склеенных между собой, полости заполнены шпатлевкой, а сверху нанесен гипс, для еще более легкой обработки матрицы. В качестве разделителя выступала виниловая пленка. Из-за легкой геометрической формы этой части ресивера в отличие от первой части, эта состоит из одной детали. Что упрощает и сокращает операции по производству данной конструкции.



Рисунок 22 – Рабочее состояние ресивера

В местах стыка частей ресивера помимо склеивания используется для дополнительной прочности стяжку винтами с тефлоновыми гайками, для исключения такого фактора как самопроизвольное откручивание от вибрационных нагрузок. Раннер с корпусом форсунки соединяется с ресивером также при помощи винтов, для герметичного соединения используется герметик. Чтобы обеспечить ровную плоскость для корпуса дроссельной заслонки, а также для усиления конструкции этой части ресивера, клеена алюминиевая пластина, герметичное соединение обеспечивается путем наличия резинового уплотнения на корпусе дроссельной заслонки. Метод вакуумной формовки, не всегда обеспечивает полную герметичность деталей корпуса ресивера, что будет отрицательно сказываться на работе двигателя, так как воздух будет проходить мимо датчика считающего количество проходящего воздуха, тем самым обедняя смесь. Также от времени и вибраций будет наблюдаться ухудшение работы ДВС из-за разрушения целостности корпуса в местах, имеющих отверстия.

Нанеся на ресивер несколько слоев лака, обеспечивается минимизацию данного эффекта, а также улучшает общий вид изделия.

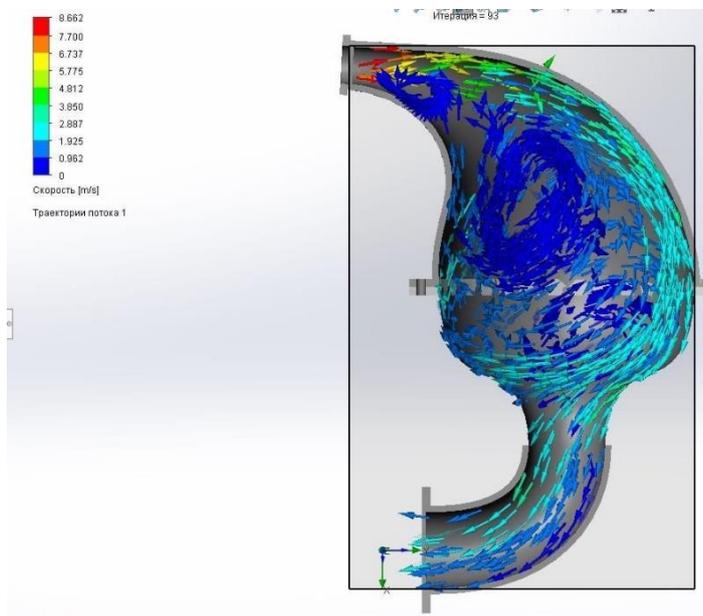


Рисунок 23 – Продувка ресивера в Solid Works

Продувка выполнена с помощью программы Solid Works. Итогом продувки является имитация прохождения воздушных потоков, их распределение. Оценивается работа пропускной способности ресивера. По имитации воздушных потоков можно проследить небольшое снижение скорости потока, наличие незначительного обратного подпора воздуха. Ускорение воздуха в раннере благодаря наличию раструба, что благотворно сказывается на наполнении и пропускной способности данного ресивера.

### 3.2 Проектирование технологической оснастки для размещения двигателя на нагрузочный стенд

Во время настройки ДВС осуществляется прохождение всех рабочих режимов двигателя, также мотор испытывает нагрузку со стороны стенда, имитируя реальную ситуацию. Исходя из этого возникают большие вибрационные и силовые нагрузки, поэтому важно использовать конструкцию оснастки, способную выдержать вышеперечисленные моменты. При размещении двигателя на технологической оснастке, необходимо придерживаться стандартного положения ДВС на мотоцикле, двигатель не должен иметь больших наклонов так как это влияет на отлив масла, что пагубно будет сказываться на механизмах во время нагрузки на двигатель. Также конструкция должна предусматривать крепление выпускной системы, ресивера, а также всех необходимых органов для работы двигателя.



Рисунок 24 – Предыдущая оснастка для размещения ДВС на стенде

Предыдущая оснастка для размещения ДВС на нагрузочном стенде имела большие габариты и немалый вес, что усложняло монтаж двигателя на стенд. Площадки для закрепления подрамника с двигателем на стенде имели разный уровень, что также вызывало дополнительную сложность при монтаже, была необходимость в изготовлении дополнительных проставок. Также эта оснастка не имела «сайлентблоков» в местах соединения двигателя с подрамником. Так как двигатель одноцилиндровый, он имеет большие вибрации несмотря на наличие балансирного вала в самом двигателе, наличие этих вибраций приводит к механическим разрушениям самой оснастки для крепления двигателя, а также к разрушению всяческих кронштейнов крепления узлов на момент настройки двигателя на стенде.



Рисунок 25 – Актуальная оснастка для размещения ДВС на стенде

Данная конструкция выполнена из профильной трубы размерами 20x40 мм с толщиной стенки 2 мм. Оснастка крепится к стенду при помощи 8 болтов М10x80 мм, что обеспечивает надежную фиксацию конструкции.

Сами опоры двигателя соединяются с подрамником четырьмя болтами М10х80, что также быстро и надежно при монтаже. В место фиксации подрамника к стенду, также крепится кронштейн для фиксации выхлопной системы. Система впуска имеет 2-а кронштейна завязанных на шпильке фиксирующей ДВС к подрамнику. Конструкция вышла легкой и имеет небольшие габариты, легкая в монтаже и удобна в хранении за счет возможности снятия опор двигателя. Площадка для крепления самого подрамника в сборе с двигателем выполнена в один уровень, исходя из опыта предыдущей конструкции подрамника. Для снижения вибрационных нагрузок по сравнению с предыдущей конструкцией оснастки было принято использовать «сайлентблоки». Данная конструкция в процессе настройки двигателя доставляет меньше проблем с потерей ее целостности от вибраций, в результате чего удастся затратить меньше времени на настройку ДВС.



Рисунок 26 – Опоры для крепления двигателя на оснастке для нагрузочного стенда

Опоры для фиксации выполнены из 4 мм стали вырезанных при помощи лазерной резки. Также имеют ребра жесткости для увеличения прочности конструкции. В местах крепления двигателя установлены «сайлентблоки» для снижения вибрационных нагрузок. Две опоры имеют большую длину в связи с особенностью картера двигателя KTM 690 DUKE. П-образная форма в месте фиксации опор к основному подрамнику, также дополняет жесткость фиксации.

### 3.3 Сборка и установка на нагрузочный стенд, подготовка экспериментальной установки



Рисунок 27 – Нагрузочный стенд SCHENCK U1-16h

Таблица 3 – Нагрузочный стенд

Наименование средств измерений	Тип, фирма
Тормоз гидравлический	SCHENK № LLF0401
Весы для измерения крутящего момента	ПВИ №1036-09-2010

При настройке двигателя используется нагрузочный стенд фирмы SCHENCK U1-16h. Данный стенд имеет возможность при помощи затормаживающего потока воды оказывать нагрузку на двигатель, тем самым имитируя разные нагрузочные режимы для ДВС. Как итог позволяет более точно настроить трех координатные зависимости подачи топлива углы опережения зажигания двигателя, тем самым повышая КПД двигателя, также увеличивая срок службы работы ДВС. Настройка двигателя на стенде не обеспечивает полной корреляции условий эксплуатации двигателя, в связи с чем возникает потребность корректировки характеристик из-за изменения температуры воздуха на впуске. Дальнейшая точная корректировка производится на площадке с записыванием логов, оцениванием и корректировкой нужных областей.

Для настройки ДВС на нагрузочном стенде SCHENCK U1-16h была изготовлена специальная проставка на гидроабразивной резке, имитирующая ведущую звезду двигателя, но соединяемую с карданным валом при помощи 4-х винтов М6х30 и имеет эластичную муфту для защиты механизмов от крутильных колебаний. Карданный вал имеет шлицевое соединение для регулировки расстояния между двигателем и самим гидравлическим тормозом.



Рисунок 28 – Опоры для двигателя с подрамником

Конструкция имеют большую прочность, а также позволяет регулировать двигатель во всех плоскостях, что необходимо для правильной работы карданной передачи, а также исключения дополнительных вибраций, так как в ходе настройки частота вращения коленчатого вала доходит до 8000. При расположении ДВС на стенде основным критерием является прямолинейность карданной передачи с минимальным удлинением кардана по шлицевому соединению. Все это необходимо для сохранения целостности подшипника вторичного вала КПП самого настраиваемого двигателя.



Рисунок 29 – Теплообменник используемый во время настройки ДВС

Во время настройки двигатель испытывает большие нагрузки, а также использование двигателя в закрытом помещении приводит к его сильному нагреву. Так как двигатель имеет водяное охлаждение была предусмотрена система охлаждения, использующая проточную воду, в качестве радиатора используется теплообменник, который внутри разделяет два контура, контур охлаждающей жидкости самого двигателя и жидкости, охлаждающей сам теплообменник. Также данная система предусматривает расширительный бачок, установленный на кронштейнах на самом стенде.



Рисунок 30 – Станция управления для нагрузочного стенда SCHENCK U1-16h

Станция управления представляет собой короб с установленными дисплеями, отображающими обороты стенда, исходя из чего в дальнейшем позволяет рассчитать полученный крутящий момент и мощность двигателя с ведущей звезды с учетом КПД. Также имеет кнопки управления изменением нагрузки на стенде, путем управления электродвигателем на самом нагрузочном стенде, который в свою очередь приводит в действие гидравлический тормоз.



Рисунок 31 – Устройство для отображения крутящего момента на стенде

Данное устройство отображает непосредственно фактический крутящий момент со стенда развиваемый двигателем в данный момент времени. Отображаемый крутящий момент с учетом КПД, именно поэтому на стенде управления нагрузочным стендом имеется возможность считывания максимальных оборотов, что в итоге позволяет пересчитывать и получать реальную мощность и крутящий момент с двигателя.



Рисунок 32 – Устройство для управления открытием дроссельной заслонки

Данное простое устройство позволяет регулировать угол открытия дроссельной заслонки. В процессе настройки необходимо выводить двигатель как на разные обороты, чтобы имитировать нагрузку на ДВС на всевозможных мощностных режимах двигателя.



Рис 33 – Вентиляция для отвода отработавших газов

В качестве отвода отработавших газов используется принудительная вентиляция, предусмотренная в цехе настройки ДВС. Соединение вентиляции с двигателем осуществляется при помощи эластичной гофры, обеспечивая герметичность. Данная гофра также позволяет иметь некую подвижность и толчки двигателя в ходе настройки.

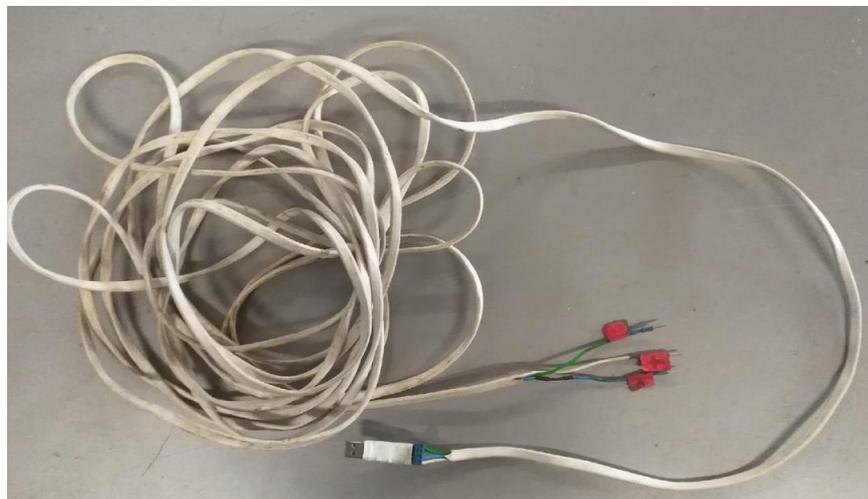


Рисунок 34 – Диагностический кабель с USB CAN адаптером

В качестве диагностического кабеля использован ШВВП 3x0,5 около 10 метров для прокладки к стенду с двигателем из кабины управления, 2 жилы отвечают за плюс и минус в системе, а одна это CAN шина, по которой

происходит обмен информацией. Для соединения с ноутбуком используется CAN адаптер. В процессе настроек используется программа АКМ 2004 это - универсальная система калибровки позволяет наблюдать и настраивать параметры калибруемой системы, обеспечивает автоматическую синхронизацию данных, поддерживает стандарты ASAM-MCD (ASAP 1b, ASAP 2).

«Основные особенности системы калибровки:

- поддерживается множество различных видов представления данных, как статических, так и динамически изменяющихся в процессе исполнения, в том числе трехмерное графическое представление сложных наборов данных,
- поддерживается концепция шаблонов, что позволяет мгновенно изменять способ графического отображения параметров,
- поддерживает различные уровни доступа к свойствам и параметрам системы, что позволяет создавать конфигурации для различных групп пользователей,
- поддерживаются несколько устройств в сети, параметры различных устройств могут объединяться для наблюдения за одним процессом,
- создает базу данных наблюдений, данные из базы можно объединять для математической обработки,
- создает базу данных параметров проекта, в которой сохраняется “история” каждого настраиваемого параметра,
- обеспечивает экспорт полученных данных для математической обработки в различных форматах.» [8]

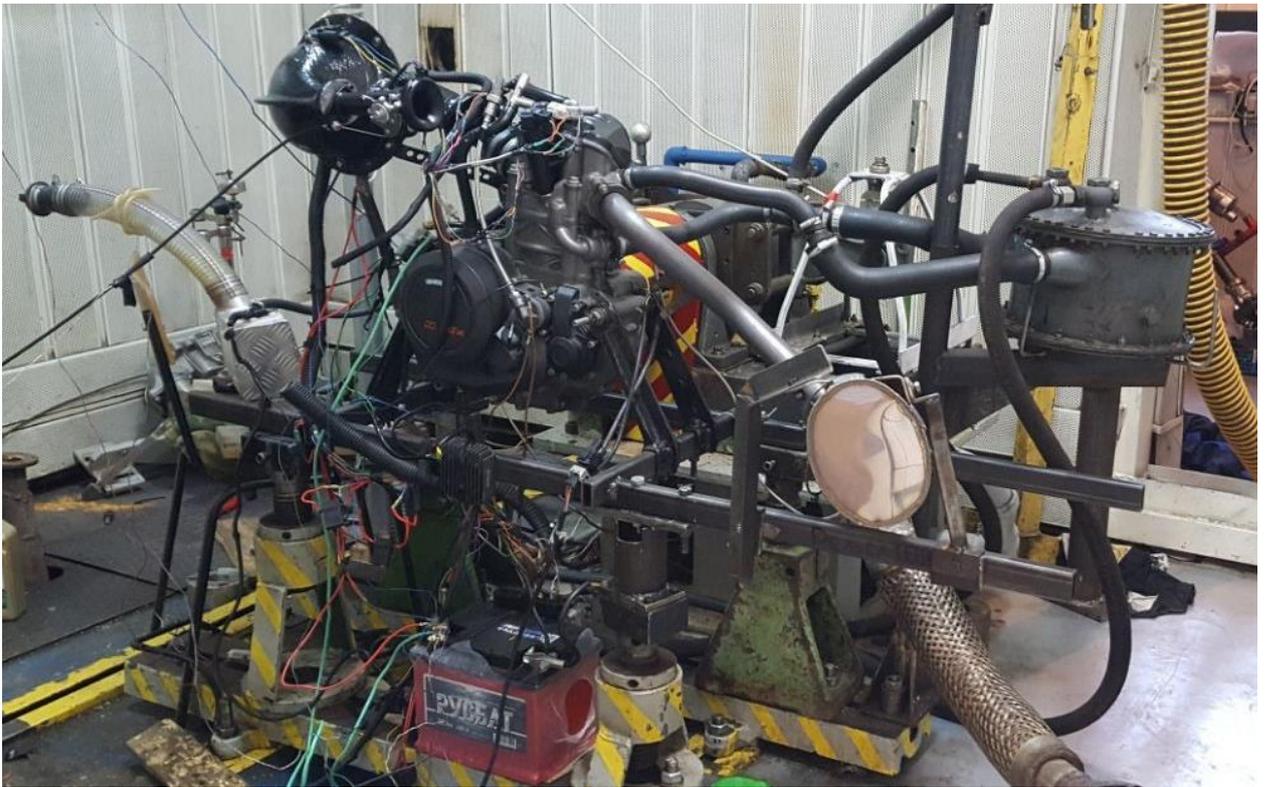


Рисунок 35 – Общий вид двигателя на стенде

Готовая рабочая система с размещенным блоком управления и общей косой, бензобаком, аккумулятором и всеми необходимыми узлами для работы ДВС, в том числе главным цилиндром сцепления для возможности переключения на разные передачи в ходе настройки.

### **3.4 Выводы**

Для проведения настройки ДВС использовался нагрузочный стенд SCHENCK U1-16h, с интегрированной системой охлаждения, пультом управления нагрузкой, рычагом для управления открытия дроссельной заслонки, прибором для снятия фактического крутящего момента со стенда. Соединением двигателя с гидравлическим тормозом служит карданная передача, соединяемая с ДВС при помощи специального переходника с наличием эластичной муфты. Использован кабель ШВВП 3х0,5 около 10

метров для прокладки к стенду с двигателем из кабины управления, 2 жилы отвечают за плюс и минус в системе, а одна это CAN шина, по которой происходит обмен информацией. Для соединения с ноутбуком используется CAN адаптер. В качестве блока ЭБУ использован M11 «Корвет» - Абит, программным обеспечением для корректировки общих параметров в том числе топливной карты и карты углов опережения зажигания была программа АКМ 2004. Для проведения настроек была разработана технологическая оснастка по закреплению ДВС на стенде. Основная конструкция которой выполнена из профильной трубы 20x40 мм и толщиной стенки 2 мм. В местах фиксации двигателя к оснастке используются «сайлентблоки» для снижения вибрационных нагрузок.

Ресивер имеет объем около 3,1 литра. В качестве матрицы была использована фанера, вырезанная на ЧПУ станке с наполнением в виде шпатлевки, в качестве разделителя готовой детали от матрицы выступала виниловая пленка. Ресивер изготовлен из углеволокна пропитанного эпоксидной смолой, и с использованием метода вакуумной формовки. Данный метод позволил достичь точности изготовления и прилегание пропитанного волокна по всей поверхности технологической оснастки. Дополнительно для герметичности и общего вида конструкции покрыт несколькими слоями лака.

## **4. Фактические испытания двигателя**

### **4.1 Описание характеристик для корректировки**

Все начинается с обей теории о работе ДВС. Двигатель внутреннего сгорания преобразует химическую энергию топлива воздушной смеси в энергию в механическую. Принято считать идеальным соотношением 14,7 частей воздуха на 1 часть топлива. В современном двигателе это соотношение контролируется блоком управления двигателя. ЭБУ двигателя имеет определенную прошивку исходя из потребностей от автомобиля. Помимо стандартных карт прошивок при помощи специальных софтов блок двигателя поддается корректировке определенных характеристик. Одними из них являются зависимость подачи топлива от давления на впуске и угла открытия дроссельной заслонки, а также трехосная зависимость углов опережения зажигания. Так как «Формула Студент» по регламенту предусматривает наличие рестриктора для бензиновых двигателей 20 мм, для двигателей работающих на Е85 19 мм. [4] При соответствии регламенту и установке рестриктора, наблюдается полный дисбаланс в работе двигателя по отношению к прежней работе ДВС на мотоцикле. Исходя из этого требуется полная перенастройка характеристик прошивки двигателя. [29]

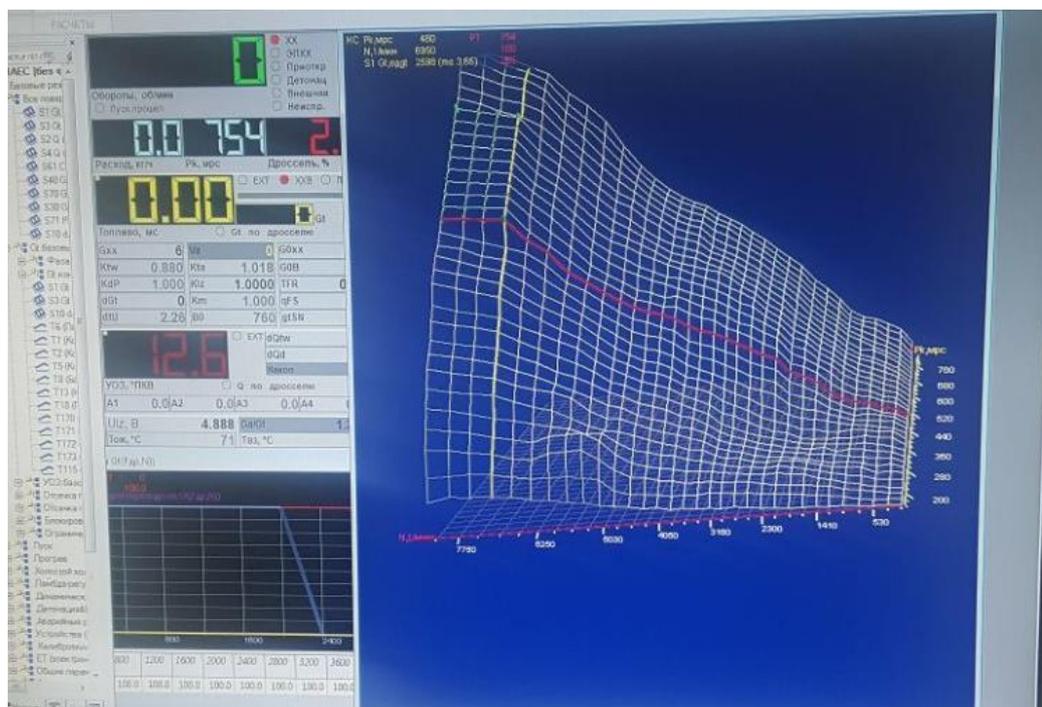


Рисунок 36 – Трехосная зависимость подачи топлива во время настройки ДВС

При помощи нагрузочного стенда с минимальных частот вращения коленчатого вала начинается корректировка зависимости подачи топлива, а именно добавление или же уменьшение порции топливовоздушной смеси. Контроль происходит за счет установки датчика кислорода в выхлопную систему который имеет свой блок с монитором, в пересчет от полученных данных отображает реальное соотношение смеси. В момент работы двигателя на карте появляется точка индикации положения расчётного уровня топлива на данном режиме работы. Контролируя соотношение смеси, отображаемое датчиком кислорода в выхлопной системе, возникает понимание, что необходимо, увеличить подачу топлива для приведения соотношения топлива к воздуху ближе к номинальному, или наоборот уменьшить количество подаваемого топлива. Исходя из передачи, включённой в двигателе и приложенной нагрузкой от стенда, происходит перемещение точки в разные зоны, где и требуется калибровка количества

подаваемого топлива для правильной и максимально эффективной работы ДВС.

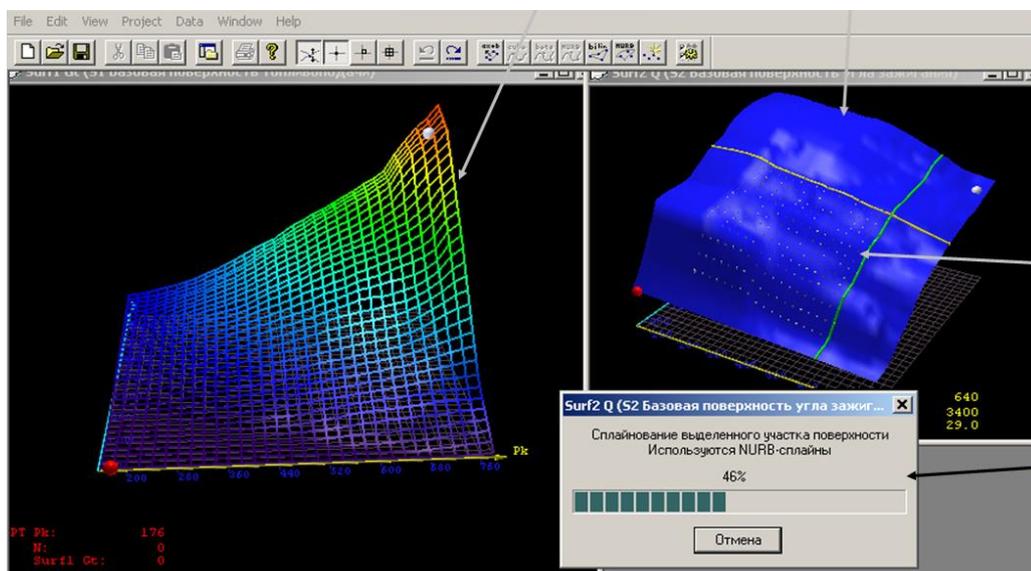


Рисунок 37 – Трехосная зависимость углов зажигания

В случае КТМ 690 DUKE в двигателе используется датчик абсолютного давления, следовательно, фактором нагрузки в системе является – давление. выбор необходимых калибровок углов происходит автоматически. При работе системы по давлению возможно использовать рабочие таблицы по давлению также по наполнению или по дросселю. Программа автоматически определит и откроет необходимые таблицы и данные для корректировок. В местах на карте зависимости, где прослушивалась детонация можно уменьшать угол опережения зажигания. При достижении корректной работы двигателя по смеси, начинается корректировка трехосной зависимости углов зажигания. Данный параметр позволяет развить большую мощность и крутящий момент на разных рабочих режимах ДВС, а также избежать разрушительной для ДВС детонации. Далее путем прохождения разных рабочих режимов двигателя производится корректировка числовых значений зависимости углов

зажигания. Плюсом двигателя KTM 690 DUKE 2013 года является наличие 2-х свечей зажигания, это позволяет получать еще большую отдачу от такта сжатия, путем дожигания топливовоздушной смеси.

#### 4.2 Характеристики полученного ресивера

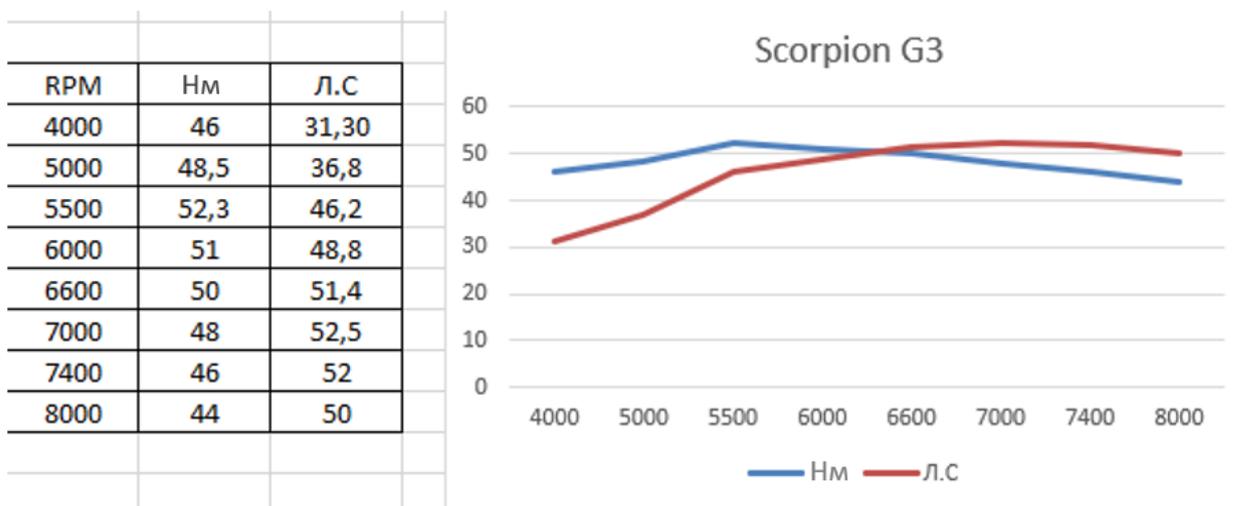


Рисунок 38 – Зависимости мощности и крутящего момента на G3

По данным зависимостям видно, что на двигателе Scorpion G3 пиковый крутящий момент имеет смещение в сторону меньшей угловой скорости коленчатого вала в сравнении с Scorpion G2. Мощность двигателя также имеет смещение в сторону меньшего количества оборотов. Оба этих фактора влияют на эластичность и конкурентную динамику двигателя практически с самого начала движения автомобиля. Так как конфигурация трасс «Формула Студент», это небольшие прямые участки, с большим количеством поворотов и шпилек, данную работу можно считать более адаптированной под необходимые задачи.

### 4.3 Выводы

Для хорошей отдачи и долговечности работы двигателя необходимо обеспечивать определенные параметры для его работы. Топливо-воздушная смесь должна иметь соотношение в районе 14,7 частей воздуха на 1 часть топлива. Необходимо избегать раннего возгорания смеси в цилиндре двигателя, именуемого детонацией, что приводит к разрушению кривошипно-шатунного механизма ДВС. В двигателях с инжектором все эти параметры контролируются блоком ЭБУ. Так как «Формула Студент» по регламенту предусматривает наличие рестриктора для бензиновых двигателей 20 мм, для двигателей работающих на E85 19 мм. При соответствии регламенту и установке рестриктора, возникает необходимость в полной перенастройке таких параметров как зависимость подачи топлива, а также для достижения большей мощности и исключения детонация, трехосная зависимость углов зажигания. В случае с двигателем KTM 690 DUKE 2013 года, который имеет 2 свечи зажигания, мы имеем возможности корректировки времени и момента подключения второй свечи, это позволяет получать еще большую отдачу от такта сжатия.

## 5 Корреляция с результатами исследования. Разработка рекомендаций для проектирования ресивера болида «Формула Студент»

### 5.1 Анализ экспериментальных результатов по кривой со стенда и соответствие расчётам

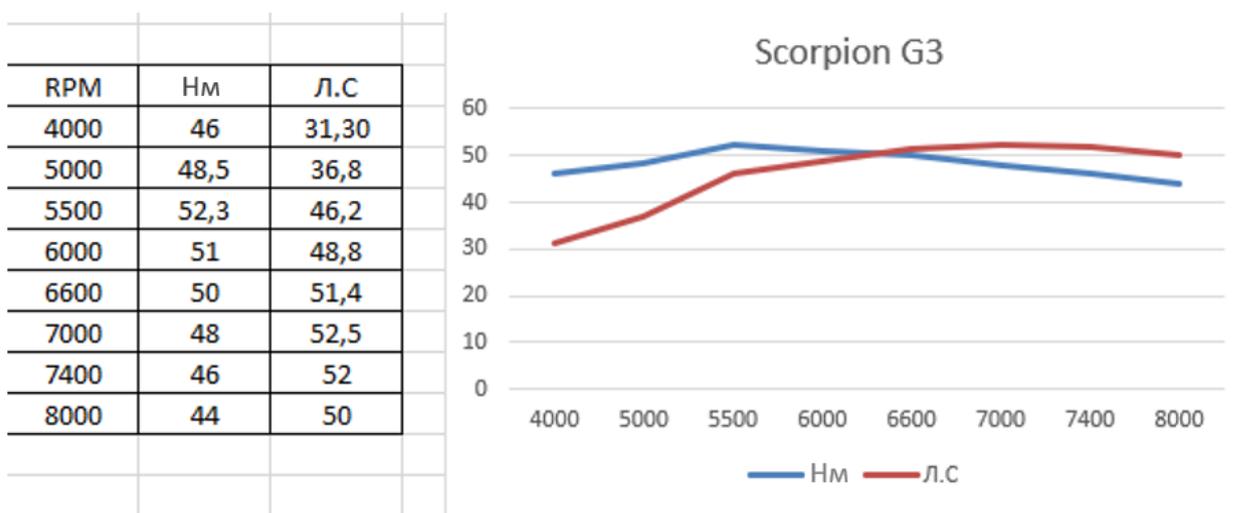


Рисунок 39 – Зависимости мощности и крутящего момента на G3



Рисунок 40 – Сравнение впускных систем с длиной раннера 100 мм и 250 мм

Полученные графики мощности и крутящего момента для двигателя Scorpion G3 отображают, что мощность и крутящий момент двигателя достигаются на малых оборотах. При частоте вращения коленчатого вала в 4000 (зеленая и синяя линии) развивается мощность 33 л.с. крутящий момент составляет 44 Нм.

Теоретические расчёты длины раннера показали, что оптимальной длиной раннера для двигателя с рестриктом составляло 250 мм. Это длина включает в себя длину порта внутри гбц, втулка-переходник с гбц на ресивер и впускной патрубков ресивера. Зная, что длина от впускного клапана до начала впускного патрубка составляет 150мм, выбираем длину раннера 100 мм. Данная длина раннера обеспечит конкурентноспособные динамические показатели двигателя (около 45 Нм и 29 л.с. на 3100 оборотах коленчатого вала).

Исходя из теоретических расчетов и реальных полученных на стенде, можно увидеть, что разница невелика не более 5%. Следовательно теоретические мощность и крутящий момент коррелируются с полученными со стенда.

## 5.2 Практическое использование результатов

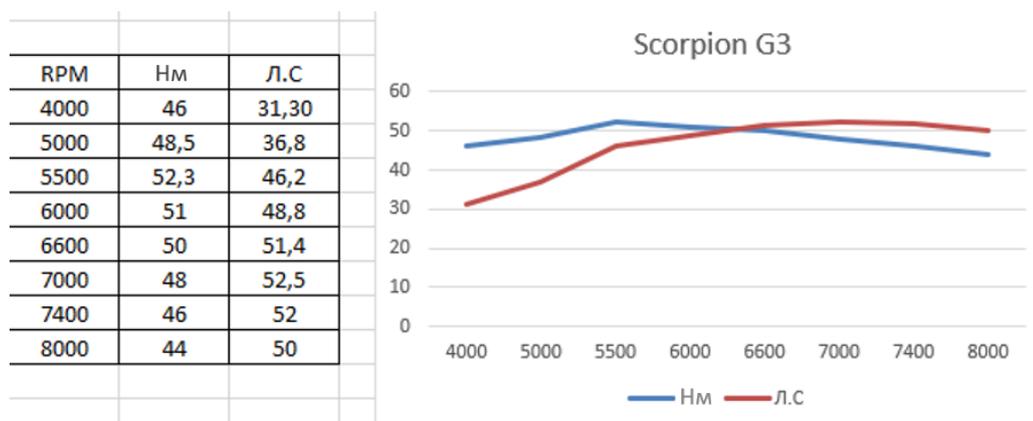


Рисунок 41 – Зависимости мощности и крутящего момента на G3

Двигатель Scorpion G3 по итогам настроек на динамическом стенде имеет пиковый крутящий момент на меньших оборотах в сравнении с Scorpion G2. Мощность двигателя также имеет смещение в сторону меньшего количества оборотов. При 4000 оборотах двигателя мощность 31 л.с. крутящий момент составляет 46 Нм.

Полученные показатели позволяют добиться эластичности и динамики двигателя практически с самого начала движения автомобиля. Так как конфигурация трасс «Формула Студент», это небольшие прямые участки, с большим количеством поворотом и шпилек, данную работу можно считать более адаптированной под необходимые задачи. Болид на данной конфигурации показал себя на соревнованиях с лучшей стороны, обеспечив хорошую динамику, моментальный отклик на изменение положения педали акселератора, быстрый набор скорости после шпилек и поворотов, что в общем принесло отличный результат в динамических испытаниях, а также внеся большой вклад в 1-ое место в общем зачете для команды.

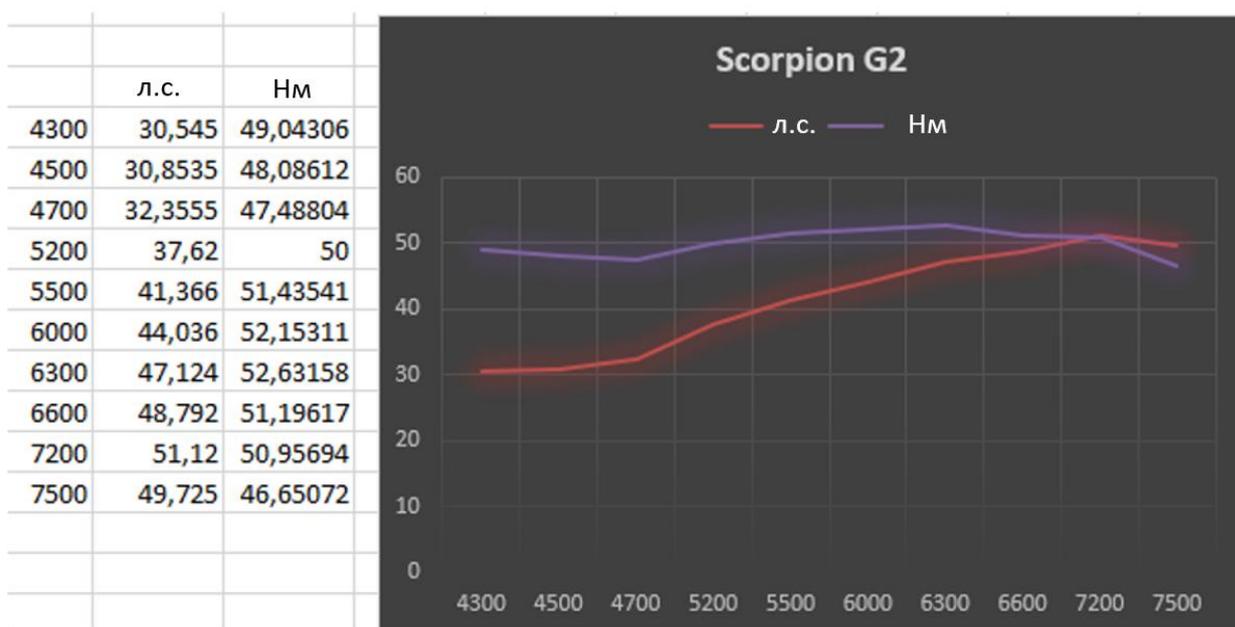


Рисунок 42 – Зависимости крутящего момента и мощности на G2

Двигатель Scorpion G2 имеет смещение как мощности, так и крутящего момента в сторону большей угловой скорости коленчатого вала, а именно подобная мощность и крутящий момент как на G3 для G2 достигается на 4500 оборотах коленчатого вала. В целом болид имел не такой боевой характер как G3, но несмотря на это хорошо показал себя на соревнованиях, а именно имел хорошую топливную эффективность, израсходовав на 22 км 1,8 литра топлива, что превзошло все команды и принесло первое место в дисциплине «Топливная эффективность». По мощности и крутящему моменту двигатель на такой конфигурации раскрывается немного позже, вызывая небольшую потерю времени на ускорениях после виражей.

### **5.3 Практические рекомендации и выводы**

«Одним из важных назначений впускного ресивера обеспечить высокую скорость на впуске в цилиндры двигателя. Данное увеличение скорости проходящего воздуха конечно же в разумных пределах, обеспечивает высокую турбулентность топливовоздушной смеси, улучшая горение смеси. Также происходит улучшение наполнения камеры сгорания, что позволяет добиться больше отдачи от двигателя.

Симметричная компоновка впускного коллектора повышает вероятность равномерного распределения топливовоздушной смеси по цилиндрам двигателя, по сравнению с более компактным, но несимметричным коллектором. Также длина каналов ресивера оказывает сильное влияние на количество воздуха попадающего в камеру сгорания во время такта впуска, для двигателей, не использующих нагнетатель. Следует понимать, что двигатели, работающие на более высоких оборотах (свыше 2700 — 3000 об/мин) имеют необходимость в коротких и более прямых впускных каналах, и наоборот для двигателей, имеющих низкие рабочие» [8]

«обороты и крутящим моментом приблизительно в среднем диапазоне оборотов требуют наличие длинных впускных каналов.» [8]

На практике видно при использовании слишком длинного раннера максимальный крутящий момент смещается в зону меньших оборотов. При использовании слишком короткого раннера максимальный крутящий момент смещается в сторону большей частоты вращения коленчатого вала. Следует избегать такого эффекта как резонанс Гельмгольца. Поток топливовоздушной смеси при открытии впускного клапана стремится по каналу ресивера в сторону камеры сгорания. В момент, закрытия клапана, воздух, который не успел попасть в цилиндр двигателя, продолжает давить на впускной клапан. Из-за наличия высокого давления воздух начинает подниматься в верхнюю часть ресивера. В итоге приводит к образованию противоток во впускном канале. При следующем открытии клапана, когда происходит смена направления потоков воздуха, наблюдается очень высокая скорость. По результат исследований данный поток может достигать приближение к сверхзвуковой скорости. Помимо влияния закрытия и открытия клапана, воздух будет стремиться менять направление так как эффект резонанса неизбежен. Колебание воздуха из стороны в сторону приводит к снижению эффективной частоты вращения коленчатого вала. Объем ресивера необходимо рассчитывать исходя из объема двигателя – для общих случаев это цифра колеблется 50 до 70% от объема двигателя. Важным моментом является конструкция коллектора в месте пересечения впускных каналов и самого ресивера. Данное пересечение желательно выполнять в форму раструба, что является идеальной формой канала для впуска воздуха.

## Заключение

Вся впускная система выполнена согласно «Rules FSG». Все элементы систем управления впуска воздуха и расхода топлива (включая дроссельную заслонку, полную систему впуска воздуха, воздушный фильтр и воздухопроводы), расположены внутри поверхности, ограниченной вершиной дуги и внешними гранями четырёх шин. Впускной коллектор надёжно крепится к блоку двигателя цилиндров при помощи кронштейнов. Крепёжные элементы с резьбовым соединением, используемые для закрепления впускного коллектора, соответствуют требованиям Т 10. Дроссельная заслонка приводится в движение механически, педалью, через трос. В качестве фильтрующего элемента выступает «фильтр нулевого сопротивления», пропитанный специальным составом для задерживания пыли. Для ограничения мощности двигателя установлен рестриктор в систему впуска воздуха; весь воздушный поток проходит через рестриктор. Для компоновки TRT, двигателя, не использующего наддув со следующим расположением элементов: дроссельная заслонка, рестриктор и двигатель. Рестриктор расположен в корпусе дроссельной заслонки, чтобы обеспечивалось легкое измерение в течение инспекционного процесса и имеет сечение 20 мм.

Основными задача ресивера являются:

- Накопление сжатого воздуха для такта впуска,
- Хранение сжатого воздуха между тактами,
- Выравнивание и поддержание определенного уровня давления во впуске,
- Смягчает пульсации, которые возникают в ходе работы двигателя,
- Первичное охлаждение сжатого воздуха,
- Сбор и последующее удаление конденсата.

Для правильной работы впускного коллектора он должен иметь строго определенную форму и емкость. Эти параметры определяются на стадии разработки, чтобы эффективно работало на всех двигателях. Объем ресивера должен быть функцией рабочего объема двигателя – в общем случае 50-70% от объема двигателя. Одно из важных мест конструкции коллектора – соединение впускных патрубков и ресивера. Это соединение должно быть выполнено в форме раструба для разгона воздуха. Кроме того, изменяя длину впускных патрубков, можно изменять распределение максимального крутящего момента по оборотам. Удлиненные патрубки позволяют увеличить момент на низких оборотах двигателя, а укороченные — на средних и высоких.

Ресивер имеет объем 3,1 литра, общая длина ранера составила 254 мм с учетом длины порта внутри гбц, втулка-переходник с гбц на ресивер и впускной патрубок ресивера. Зная, что длина от впускного клапана до начала впускного патрубка составляет 150мм, выбирали длину раннера 104мм. В качестве матрицы была использована фанера, вырезанная на ЧПУ станке с наполнением в виде шпатлевки, в качестве разделителя готовой детали от матрицы выступала виниловая пленка. Ресивер изготовлен из углеволокна пропитанного эпоксидной смолой, и с использованием метода вакуумной формовки. Данный метод позволил достичь точности изготовления и прилегание пропитанного волокна по всей поверхности технологической оснастки. Дополнительно для герметичности и общего вида конструкции нанесен несколькими слоями лак.

Использование материалов для изготовления впускного ресивера как алюминий и 3D печать из высокопрочных полимеров нецелесообразна. В первом случае будет избыточный вес, а команды «Формула Студент» стремятся к снижению общего веса болида. Высокопрочные полимеры для печати, также сильно влияют на избыточный вес изделия, плюс имеют большую стоимость.

Для проведения настройки ДВС был использован нагрузочный стенд SCHENCK U1-16h со всеми необходимыми приборами по снятию мощности и обеспечению жизнедеятельности двигателя. Соединением двигателя с гидравлическим тормозом послужила карданная передача. В качестве блока ЭБУ был использован M11 «Корвет» - Абит, софтом для корректировки общих параметров в том числе топливной карты и карты углов опережения зажигания была программа АКМ 2004. Для проведения настроек была разработана технологическая оснастка по закреплению ДВС на стенде. Основная конструкция которой выполнена из профильной трубы 20x40 мм и толщиной стенки 2 мм. В местах фиксации двигателя к оснастке используются «сайлентблоки» для снижения вибрационных нагрузок.

По итогу проделанных работ двигатель показал следующие характеристики: максимальная частота вращения коленчатого вала 8000 мощность составила при этом 50 л.с., в то время как крутящий момент около 44 Нм. Максимальная мощность двигателя достигается при 7000 оборотах двигателя составляет 52,5 л.с., а крутящий момент 48 Нм. Отличительной чертой G3 является достижение крутящего момента 52,3 Нм уже с 5500 оборотов и мощности в 46,2 л.с., что обеспечивает эластичность двигателю и хорошие динамические и временные показатели на трассе. Все это обеспечило хорошие показатели болида в динамических дисциплинах и внесло значимый вклад в общий зачет на соревнованиях «Formula Student Moscow 2020» принеся первое место команде TRT.

## Список используемых источников

1. Атанов С. Н., Р.Д. Еникеев экспериментальное исследование метода повышения коэффициента наполнения четырехтактного двигателя внутреннего сгорания интенсификацией дозарядки [электронный ресурс] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета/: электрон. научн. журн. 2017.
2. Атанов С. Н., Метод увеличения коэффициента наполнения четырехтактного двигателя внутреннего сгорания [электронный ресурс] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета/: электрон. научн. журн. 2009.
3. Вибе И.И. Теория двигателей внутреннего сгорания: Конспект лекции. - Челябинск: ЧПИ, 1974. – 252.
4. Впускной коллектор с изменяемой геометрией на двигатель 21124. Механика. [электронный ресурс]: URL <https://www.drive2.ru/b/1752297/>.
5. Гирявец А. К., Теория управления автомобильным бензиновым двигателем [Электронный ресурс]// Drivecontact. URL: <https://drivecontact.ru/avtosport/karting/>.
6. Двигатель без ГРМ — альтернатива от Freevalve [электронный ресурс]: URL <http://www.sciencedebate2008.com/dvigatel-bez-grm-alternativaot-freevalve/>.
7. Жолобов Л. А., Суворов Е. А., Васильев И. С. Влияние дополнительной емкости во впускной системе на наполнение двс [электронный ресурс]// Современные проблемы науки и образования: электрон. научн. журн. 2013. N URL: <https://www.scienceeducation.ru/ru/article/view?id=8270>.
8. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1983.

9. Программа АКМ [электронный ресурс]: URL <https://abit.spb.ru/diagnostics/programma-akm-lite/>.
10. Регламент соревнований Formula Student Rules 2020 [Электронный ресурс]//Fb. URL:[https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-rules\\_2020\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-rules_2020_V1.0.pdf).
11. Рестриктор [электронный ресурс]: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80>.
12. Система изменения геометрии впускного коллектора [электронный ресурс]:URL [http://systemsauto.ru/vpusk/variable\\_length\\_intake\\_manifold.html](http://systemsauto.ru/vpusk/variable_length_intake_manifold.html).
13. Система изменения фаз газораспределения [электронный ресурс]: URL <http://systemsauto.ru/vpusk/vvt.html>.
14. Система изменения фаз газораспределения [электронный ресурс]: URL <http://systemsauto.ru/vpusk/vvt.html>.
15. Устройство гоночного болида [Электронный ресурс] //.
16. Anshul Singhal, Mallika Parveen, Member, IAENG Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol III, WCE 2013, July 3 - 5, 2013, London, U.K.[http://www.iaeng.org/publication/WCE2013/WCE2013\\_pp1847-1851.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2013/WCE2013_pp1847-1851.pdf).
17. AUTOZINE TECHNICAL SCHOOL [электронный ресурс]: URL [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/vvt\\_3.htm](http://www.autozine.org/technical_school/engine/vvt_3.htm).
18. AUTOZINE TECHNICAL SCHOOL [электронный ресурс]: URL [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/vvt\\_2.htm#Cam-changing](http://www.autozine.org/technical_school/engine/vvt_2.htm#Cam-changing).
19. AUTOZINE TECHNICAL SCHOOL [электронный ресурс]: URL [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/vvt\\_31.htm](http://www.autozine.org/technical_school/engine/vvt_31.htm).
20. AUTOZINE TECHNICAL SCHOOL [электронный ресурс]: URL [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/Intake\\_exhaust.html](http://www.autozine.org/technical_school/engine/Intake_exhaust.html).
21. BMW VANOS Explained (No Magic Necessary) [электронный ресурс]: URL <https://www.eeuroparts.com/blog/557/bmw-vanos-explained/>.

22. Brandstetter W. Ähnlichkeitsgesetze des Viertaktmotors – MTZ, 1967, 28, № 9, S. 341 – 349. 81.
23. Buchman, Michael R., Amos G. Winter Method for Turbocharging Single Cylinder Four Stroke Engines [текст] //16th International Conference on Advanced Vehicle Technologies; 11th International Conference on Design Education; 7th Frontiers in Biomedical Devices.
24. 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>.
25. Development of a Power-train for a Formula SAE Competition Vehicle [Электронный ресурс] <http://papers.sae.org/2010-32-0085/>.
26. Giovanni Vichi, Luca Romani, Lorenzo Ferrari, Giovanni Ferrara Development of an engine variable geometry intake system for a Formula SAE application [текст] // 69th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2014.
27. Information technology. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Formula\\_Student](https://ru.wikipedia.org/wiki/Formula_Student).
28. Jenny E. Die Verwertung der Abgasenergie beim aufgeladenen Viertaktmotor. – The brown bavery Review, 1950, № 11, p. 447 – 461 6.
29. KTM DUKE 690 2017 [электронный ресурс]: URL <http://www.zabikers.co.za/2017/03/17/ktm-690-duke-2017/>.
30. Oh Yide, Andre Design and analysis of the intake system of a Formula SAE car [электронный ресурс]// NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE 2012: URL:[https://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/10635/34336/1/AndreOh%20A006651 7B%20Thesis%20Final.pdf](https://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/10635/34336/1/AndreOh%20A006651%207B%20Thesis%20Final.pdf).
31. ØYVIND GUNDERSEN Free Valve Technology[текст] // Master of Science Thesis Stockholm, Sweden 2009.

32. SUBHASH SESHADRI, DESIGN AND CFD ANALYSIS OF THE INTAKE MANIFOLD FOR THE HONDA CBR250RR ENGINE [текст] // THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, August 2015.

33. 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). - Volume1. pp.91 104. URL: [http://ijame.ump.edu.my/images/Volume\\_1/S.%20A.%20Sulaiman%20et%20al.pdf](http://ijame.ump.edu.my/images/Volume_1/S.%20A.%20Sulaiman%20et%20al.pdf).

34. Variable valve timing [электронный ресурс]: URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Variable\\_valve\\_timing](https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_valve_timing).

35. Variable-length intake manifold [электронный ресурс]: URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-length\\_intake\\_manifold#cite\\_note-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Variable-length_intake_manifold#cite_note-1).

36. VTEC [электронный ресурс]: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/VTEC>.