

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование)

13.03.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

«Альтернативные источники энергии транспортных средств»

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Совершенствование топливной системы бензиновых двигателей рабочим объемом $V_h = 1,6$ литра

Обучающийся

А.В. Важенцев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

(ученая степень, ученое звание, Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Топливная рампа – одна из основных составляющих топливной системы автомобиля. Она применяется в системах многоточечного впрыска топлива (англ. - Multi Point Fuel Injection system, сокращенно - MPFI) — это усовершенствованная система подачи топлива, используемая в современных двигателях. MPFI представляет собой систему или метод подачи топлива в двигатель внутреннего сгорания через несколько портов, количество которых не менее количества цилиндров двигателя.

Цель бакалаврского проекта заключается в анализе потенциала совершенствования топливной системы бензиновых двигателей на основании анализа возможностей модернизации топливной рампы.

В данной бакалаврской работе изложены итоги разработки топливной рампы для двигателя ВАЗ 1,6 литра, с возможностью эффективного использования с агрессивными альтернативными топливами. Композиция работы охватывает теоретическое обоснование в пояснительной записке и визуализацию проектных решений, представленных в графических материалах.

Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 5 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 18 рисунка, 27 таблиц, списка использованных источников (61 источник). Основной текст изложен на 58 страницах.

Графический раздел проекта включает в себя восемь листов размером А1, которые визуальнo отображают сведения, изложенные в пояснительной записке.

Abstract

The fuel rail is one of the main components of the vehicle's fuel system. It is used in multi-point fuel injection systems (Multi Point Fuel Injection system, abbreviated as MPFI) - this is an advanced fuel supply system used in modern engines. MPFI is a system or method of supplying fuel to an internal combustion engine through multiple ports equal to or greater than the number of engine cylinders.

The purpose of the bachelor's project is to analyze the potential for improving the fuel system of gasoline engines based on an analysis of the possibilities of modernizing the fuel rail.

This bachelor's thesis outlines the results of the development of a fuel rail for the VAZ 1.6 liter engine, with the possibility of effective use with aggressive alternative fuels. The composition of the work covers theoretical justification in an explanatory note and visualization of design solutions presented in graphic materials.

The explanatory note consists of an abstract, an introduction, 5 sections, a conclusion with the main results and conclusions, contains 18 figures, 27 tables, a list of sources used (61 sources). The main text is presented on 58 pages.

The graphic section of the project includes eight sheets of A1 size, which visually display the information contained in the explanatory note.

Содержание

Введение.....	5
1 Совершенствование топливной системы бензиновых двигателей	6
1.1 Анализ перспектив использования альтернативных видов топлива	6
1.2 Совершенствование топливных систем бензинового двигателя	11
1.3 Проблемы применения стандартных систем питания (топливных рампы) при использовании альтернативного топлива.....	14
1.4 Пластиковые материалы для топливных систем.....	18
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя	24
2.1 Тепловой расчет при работе на бензине	24
2.2 Тепловой расчет при работе на метаноле	27
2.3 Тепловой расчет при работе на этаноле	29
2.4 Тепловой расчет при работе на E85 (85% этанола и 15% бензина)	31
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	34
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	34
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	35
4 Анализ модернизированного корпуса топливной рампы	40
5 Моделирование работы двигателя с новой рампой в программе Ricardo Wave.....	43
Заключение	51
Список используемых источников	52

Введение

Топливная рампа – одна из основных составляющих топливной системы автомобиля. Она применяется в системах многоточечного впрыска топлива (англ. – Multi Point Fuel Injection system, сокращенно – MPFI) — это усовершенствованная система подачи топлива, используемая в современных двигателях. MPFI представляет собой систему или метод подачи топлива в двигатель внутреннего сгорания через несколько портов, количество которых не менее количества цилиндров двигателя.

Конструкция топливной рампы играет большую роль в эффективности подачи топлива в двигатель и, следовательно, влияет на его расход.

Конструкция топливной рампы должна удовлетворять ряду требований:

- подача топлива к дозирующему устройству – форсунке при требуемом давлении впрыска к моменту начала впрыска;

- оптимальное распределение топлива к форсунке между отдельными впрысками при минимальных колебаниях давления

- обеспечение герметичности топливной системы двигателя, заключающееся в уменьшении выбросов в окружающую среду углеводородного топлива в результате утечек и его испарения.

Реализация конструкции топливной рампы также опирается на требование по мгновенной скорости потока.

1 Совершенствование топливной системы бензиновых двигателей

1.1 Анализ перспектив использования альтернативных видов топлива

Характеристики различных альтернативных энергетических источников.

Каждая медаль обладает оборотной стороной. Вариативные альтернативные источники энергии выделяются своими плюсами и минусами.

Многие альтернативные источники энергии для двигателей обладают более высоким экологичным профилем по сравнению с традиционными видами топлива. Некоторые из них уже нашли свое применение в коммерческой сфере. В дальнейшем тексте предоставляется обзор разнообразия альтернативных видов топлива для автомобилей, включая анализ их экологических, экономических и энергетических характеристик, доступности, стоимости производства и уровней выбросов в атмосферу.

В таблице 1 представлено сопоставление разных характеристик топлив. За основу взят бензин.

Таблица 1 – Выбросы СНГ в сравнении с другими видами топлива (г/км) [53]

	ТНС	НМНС	СО	NO _x	PM
Бензин	0.08	0.07	0.60	0.03-0.08	0.001
Дизель	0.06	0.06	0.50	0.30-0.50	0.040
Дизель с фильтром твердых частиц	0.01	0.01	0.01	0.30-0.50	0.002
КПГ	0.15	0.30	0.30	0.03-0.06	<0.001
Автогаз	0.05	n.a.	0.30	0.05-0.08	<0.001

Сжатый природный газ (СПГ) на протяжении многих лет активно эксплуатируется благодаря его стабильной и развитой технологии. Примечателен как наиболее экологичный вид ископаемого топлива, обеспечивая низкие уровни загрязняющих выбросов в атмосферу. Его

стоимость традиционно ниже по сравнению с нефтяными продуктами, например, бензином, что способствует укреплению энергетической независимости. Тем не менее, производство СПГ предполагает эксплуатацию невозобновляемых источников энергии, ограничивая его экспансию и широкое применение в глобальном масштабе.

Электрический автомобиль характеризуется отсутствием выбросов CO₂, что приводит к экономии на топливе. Это может выступать как краткосрочная и среднесрочная альтернатива использованию автомобилей на бензине. Рынок пополнился моделями электромобилей, предлагающими идеальное решение для использования в городских условиях. Экологичность электромобиля напрямую зависит от методов получения электроэнергии. Тем не менее, первоначальные затраты на приобретение электромобилей остаются высокими. Прогнозируется, что стоимость закупки снизится благодаря увеличению объемов производства батарей.

Водород представляет собой перспективное альтернативное топливо благодаря его экологическим характеристикам, в особенности, минимальным эмиссиям при сгорании. Однако препятствиями на пути к широкому использованию водородного топлива являются его производство и распределение. Традиционные способы производства водорода оказываются экологически вредными, в то время как инновационные технологии пока не способны обеспечить необходимые объемы. Более того, низкая энергоемкость водорода требует создания особых условий для его хранения, например, использование высокотехнологичных резервуаров. Это существенно усложняет и удорожает процесс. Высокая стоимость автомобилей на водородных топливных элементах также является существенным барьером, снижающим их привлекательность на автомобильном рынке.

Сегодня автотранспорт во всем мире все чаще использует биотопливо, произведенное из возобновляемых источников, что способствует более широкому спектру энергоносителей. Международное энергетическое

агентство предсказывает, что биотопливо будет составлять 7% от общего объема автомобильных топлив уже в ближайшем будущем, и расчеты показывают увеличение его доли до 27% к 2050 году. Это подчеркивает ключевую роль биотоплива в процессе постепенного отказа от традиционных видов топлива как на ближайшую, так и на отдаленную перспективу (таблица 2). Однако существуют и определенные осложнения при переходе на биотопливо.

Таблица 2 – Свойства различных топлив [30]

	Химическая структура	Источник	Физическое состояние	устойчивость	Эксплуатационные расходы	Инвестиционная стоимость
Биотопливо Биодизель	Метил, этил	Жиры и масла растительного происхождения	Жидкость	Возобновляемый	высокий	середина
Биотопливо Этанол E100	C ₂ H ₅ OH	урожай сахара	Жидкость		высокий	середина
СПГ	CH ₄	Подземные запасы	Криогенная жидкость	Неустойчивое преимущество – метод производства, возобновляемый	низкий	середина
СПГ	CH ₄	Подземные запасы	Сжатый газ		низкий	середина
Электрический литий-ионный аккумулятор	Литий-ионный	Уголь, атомная энергия, природный газ, гидроэнергетика, ветер, солнечная энергия, биотопливо	Электричество	Возобновляемые источники энергии широко распространены	низкий	высокий
Водород	H ₂	Природный газ, электролизная вода, биомасса	Криогенная жидкость	Преимущество метода производства возобновляемых источников	низкий	высокий
Сжиженный нефтяной газ	C ₄ H ₁₀ C ₃ H ₈	Сырая нефть, природный газ	Жидкость	Неустойчивое преимущество – метод производства, возобновляемый	низкий	середина
Сжатый воздух	воздух	воздух	Сжатый газ	Используйте электричество для сжатия воздуха	середина	
Бензин	углеводород	Сырая нефть	Жидкость	Неустойчивый	середина	середина

Производство биотоплива первого поколения тесно связано с использованием сельскохозяйственных культур, что делает его стоимость

вариативной из-за колебаний цен на исходное сырье. Это, в свою очередь, подвергает риску стабильность цен на биотопливо. Более того, массовое производство такого рода биотоплива может угрожать продовольственной безопасности стран. В этом контексте, разработка и применение биотоплива второго поколения видится перспективным решением указанных проблем.

Транспорт на воздушной подушке все еще требует технического усовершенствования для удовлетворения запросов по дальности перемещения.

Применение воздуха как энергоносителя минимизирует экологический ущерб. Однако ограниченная энергоемкость, вызовы, связанные с его сохранностью и энергозатратный процесс заправки, замедляли прогресс в области транспорта, работающего на сжатом воздухе.

Значимость применения возобновляемых энергетических ресурсов в качестве автомобильного топлива ясна. Впрочем, способность альтернативных энергетических ресурсов заместить традиционное ископаемое топливо в значительной степени обусловлена развитием передовых технологий и экономической эффективностью. Некоторые энергоносители сейчас не могут заменить традиционное топливо, несмотря на их лучшие показатели в области экологии. Кроме того, экспансию рынка автотранспорта на альтернативном топливе может поддержать государственная стратегия через расширение специализированной инфраструктуры, создание льготной налоговой схемы для альтернативных топлив, инвестиции в научные исследования и разработки, а также через международные партнерства.

Сравнение плотности энергии.

Каждая медаль обладает оборотной стороной. Разнообразные альтернативные энергетические ресурсы характеризуются своими плюсами и минусами.

Многие альтернативные источники топлива демонстрируют улучшенные экологические характеристики по сравнению с традиционным

бензином и дизелем. Часть из них находит применение в промышленных масштабах. Далее представлен обзор разнообразия альтернативных видов топлива для автомобилей, включая анализ их достоинств и недостатков, энергоэффективность, воздействие на окружающую среду, затраты на производство и эксплуатационную экономичность, а также их энергетическую ценность и влияние на уровень выбросов загрязняющих веществ.

Топливо отличается рядом характеристик, включая такие параметры, как энергетическая ценность, тепловая мощность, удельная энергетическая плотность и прочее. Удельная энергетическая плотность указывает на объем удерживаемой энергии на единицу объема. В автомобильной отрасли пространство для хранения топлива ограничено, из-за чего дальность поездки напрямую связана с энергетической плотностью используемого топлива. Поэтому для оценки автономности движения различных транспортных средств выделяют показатель плотности энергии топлива.

Из представленной на Рисунке 1 информации становится очевидным, что уровень энергетической плотности у разных видов топлива существенно отличается. Так, дизель обладает наивысшей плотностью энергии, достигая 35 мегаджоулей на литр, в то время как сжатый воздух показывает минимальный показатель - всего 0,2 МДж/л. В связи с этим автомобили, использующие сжатый воздух в качестве топлива, сталкиваются с необходимостью увеличения емкости хранилища топлива или с удлинением времени для их повторной заправки. Тем не менее, следует заметить, что автономность работы электромобилей, как показано на иллюстрации, значительно выше, чем могло бы показаться. Это обусловлено более высоким коэффициентом полезного действия электромоторов, который превышает 80%, по сравнению с двигателями внутреннего сгорания, КПД которых колеблется в пределах 15-20%.

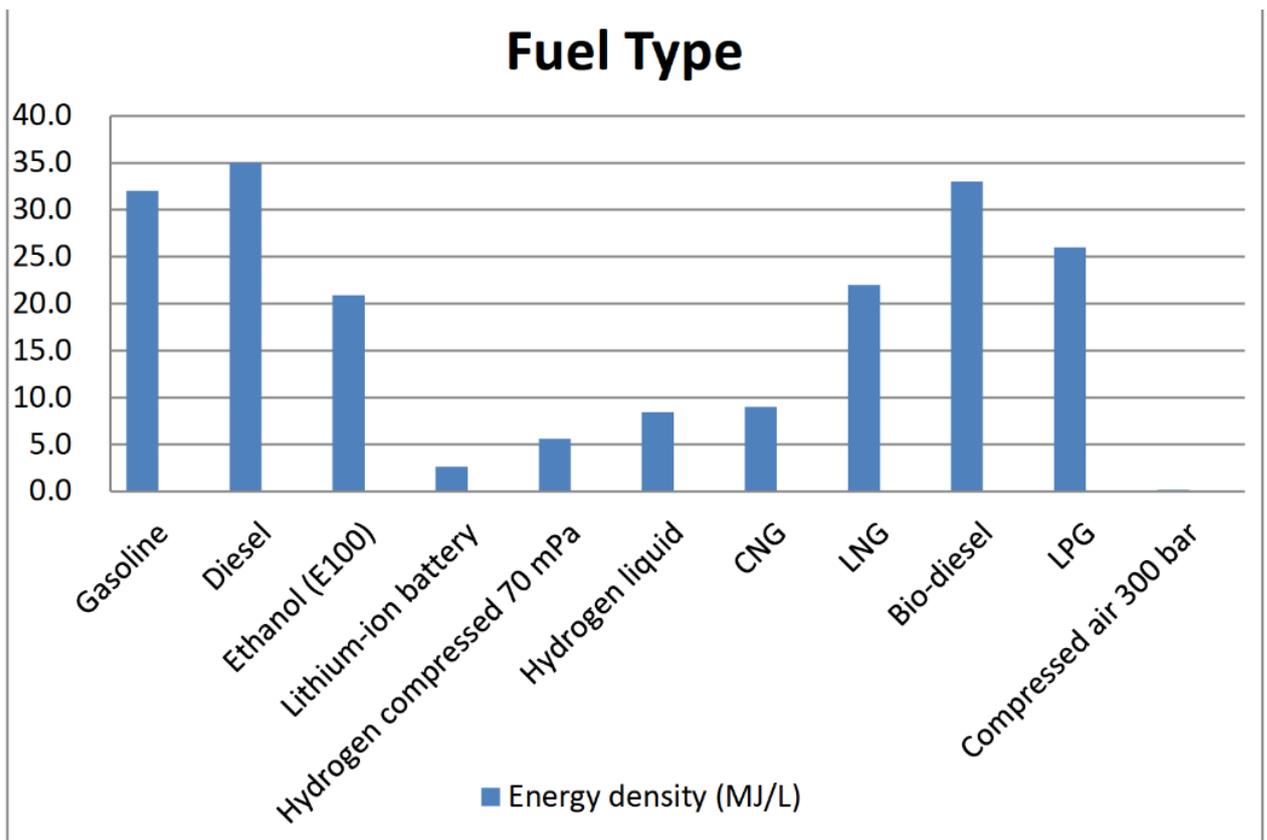


Рисунок 1 – Плотность энергии для различных видов топлива [30]

1.2 Совершенствование топливных систем бензинового двигателя

Технология впрыска топлива с портом была разработана в начале 1980-х годов, когда она начала заменять карбюратор. К 1995 году карбюратор был почти полностью заменен из-за необходимости соблюдения законодательства по выбросам, а также из-за улучшенного времени переходного процесса (Чжао и Лай (1995)). В этой системе используются форсунки с электронным управлением для подачи топлива под определенным углом поворота коленчатого вала, в отличие от карбюратора, где топливо будет тонуть в потоке воздуха из-за зоны низкого давления выше по потоку.

Системы сгорания PFI эволюционировали от одноточечного впрыска к многоточечному и последовательно настраиваются под каждый отдельный цилиндр. Системы PFI обеспечили более высокий уровень контроля над подачей топлива: соотношение воздух-топливо (AFR) можно было регулировать быстрее, что ухудшало стабильность сгорания, уменьшало

выбросы (особенно ubHC) и увеличивало удельную мощность двигателя (Stone. (1999)).

Одноточечный и многоточечный впрыск топлива.

Одноточечный впрыск (SPI) был первой внедренной системой PFI. Он использует одну форсунку, расположенную в главном впускном канале, для подачи топлива во все цилиндры. Жидкое топливо впрыскивается под давлением обычно ниже 5 бар. Испарение топлива и его смешивание с воздухом происходит преимущественно перед камерой цилиндра. Учитывая расстояние между расположением форсунок и впускными клапанами, вероятны изменения AFR смеси для каждого цилиндра. Степень изменчивости подачи топлива будет зависеть от геометрии впуска; более высокая изменчивость отрицательно влияет на характеристики двигателя (Чжао и Лай, (1995)).

В системе многоточечного впрыска (MPI) на цилиндр используется одна форсунка, как схематически показано на рисунке 4. В этой конфигурации форсунки расположены ближе к впускным клапанам, что значительно улучшает переходные характеристики (Чжао и Лай, (1995)). Важным параметром управления для систем MPI является «нацеленность» распыла топлива. Обычно его цель воздействовать на заднюю часть впускного клапана (самую горячую поверхность в канале) для улучшения испарения и смешивания топлива. При неправильном выравнивании струя топлива будет ударяться о другие поверхности, увеличивая смачивание стенок и создавая нежелательные лужи топливной пленки. Эта проблема становится особенно важной во время холодного запуска, когда клапан нагревается первой поверхностью (Чжао, (2007)). Значительным преимуществом систем MPI является возможность фазирования впрыска топлива. Момент впрыска можно изменять в зависимости от фаз газораспределения каждого цилиндра, что еще больше улучшает управление AFR.

Впрыск может выполняться в период открытых клапанов или когда клапаны закрыты, что увеличивает гибкость двигателя, потенциально улучшает контроль выбросов и расширяет предел обедненной смеси.

Нагрузка на двигатель контролируется дроссельной заслонкой для изменения скорости потока воздуха во впускном коллекторе. Затем датчик массового расхода и электронный блок управления (ЭБУ) рассчитывают необходимое количество впрыскиваемого топлива. Переходные поставки топлива могут осуществляться быстрее с помощью MPI. Лучшее распределение топлива также достигается за счет дозирования топлива для каждого цилиндра, что снижает разницу в AFR между цилиндрами и, следовательно, снижает выбросы двигателя и улучшает стабильность сгорания. Электронный сигнал контролирует продолжительность впрыска топлива, которая обычно варьируется от 1,5 до 18 мс.

Зажигание контролируется свечой зажигания, которая генерирует электрический разряд ближе к концу такта сжатия, между 60 градусами угла поворота коленчатого вала (CAD) перед верхней мертвой точкой (VTDC) и 20 CAD VTDC. Если топливовоздушная смесь находится в пределах воспламеняемости, вокруг свечного зазора образуется ядро пламени, которое затем распространяется по камере, поглощая топливовоздушную смесь. Требуется точный контроль зажигания, поскольку позднее (запаздывающее) зажигание может привести к неполному сгоранию, снижению эффективности и увеличению выбросов uH_2C и CO . Раннее зажигание может вызвать детонацию двигателя. Это явление возникает, когда повышение давления вследствие сгорания приводит к тому, что температура конечного газа (часть топливовоздушной смеси, которая последней достигает пламени) достигает точки самовоспламенения, создавая очень быстрое повышение давления, которое может привести к повреждению двигателя. Выхлопные газы обычно очищаются с помощью трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. Наиболее эффективно они работают со стехиометрическими воздушно-

топливными смесями и при температурах выше 400°C. Поэтому это не решает проблему выбросов при холодном запуске.

1.3 Проблемы применения стандартных систем питания (топливных рамп) при использовании альтернативного топлива

У каждого автопроизводителя своя конструкция и конфигурация топливной рампы, в том числе определяемая количеством форсунок. Дополнительными особенностями конструкции рамп является варианты расположения, подводящего топливопровода и наличие дополнительных элементов, например, демпфера или диагностического штуцера давления. Данный факт определяет специфику обслуживания топливной системы в эксплуатации

По функциональному предназначению существуют три вида топливных рамп. Первый – аккумулятор давления дизельных двигателей, оборудованных системой Common Rail, с уровнем давления в ней от 1500 МПа до 3000 МПа. Второй вид – топливные рампы для бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива в цилиндры двигателя, с уровнем давления в ней от 3,0 МПа до 13 МПа (англ. – Gasoline Direct Injection system, сокращенно – GDI, как разновидность – TSI, TFSI и др.). Третий вид – топливная рампа бензинового двигателя с распределенным впрыском топлива во впускной трубопровод MPFI, с уровнем давления в ней от 350 кПа до 400 кПа (англ. - Port Fuel Injection system, сокращенно - PFI).

В основе конструкции всех топливных рамп лежит полая трубка с подключенными вдоль оси форсунками, к которой подводится бензин топливопроводом; торцы трубки «заглушены» или на нем установлен регулятор давления или иной исполнительный механизм.

В сечении рампа выполняется круглой, реже овальной, или прямоугольной, на некоторых конструкциях квадратной формы.

Применимость того или иного сечения зависит от производителя, особенностей топливной системы в целом.

Конструктивные параметры – наружные и внутренние диаметры для круглого сечения и длины сторон прямоугольного профиля, из которого, как правило, делается основание рампы.

Способ и место подключения форсунок и самой топливной рампы к топливной системе автомобиля зависят от особенностей конструкции двигателя и его топливной системы. В бензиновых двигателях PFI рампа крепится к элементам впускного тракта (ресиверу или головке двигателя) через болтовое (шпилечное) соединение с помощью специальных крепежных элементов (кронштейнов крепления), выполненных на корпусе рампы.

Автомобильная топливная рампа для бензиновых двигателей MPFI изготавливается из листовой стали, алюминиевых сплавов или термопластичных материалов, которые должны обладать химической, механической и термической стойкостью к условиям работы. Для иллюстрации на рисунке 2, 3, 4 и 5 представлены различные варианты топливных рамп бензиновых двигателей.

На рисунке 2 представлена топливная рампа Flexstart с электроподогревателями.



Рисунок 2 – Топливная рампа бензинового двигателя Flexstart с электроподогревателями

На рисунке 3 представлена топливная рампа бензинового двигателя из материала полиамид, армированного стекловолокном (РА) 66.



Рисунок 3 – Топливная рампа бензинового двигателя из материала полиамид, армированного стекловолокном (РА) 66

На рисунке 4 представлена разборная топливная рампа мотоциклетного бензинового двигателя.

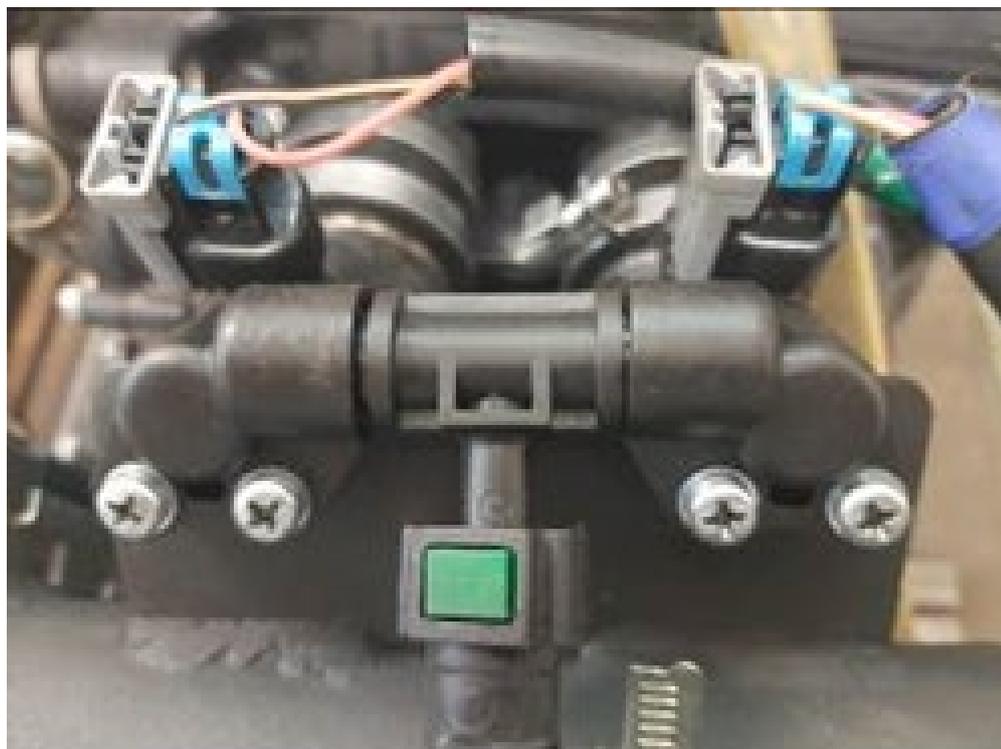


Рисунок 4 – Разборная топливная рампа мотоциклетного бензинового двигателя

На рисунке 5 представлены топливные рампы бензиновых двигателей компании Bosch, выполненные из композитных и стальных материалов [3].



Рисунок 5 – Топливные рампы бензиновых двигателей компании Bosch, выполненные из композитных и стальных материалов [3]

В основе конструкции топливной рампы, как правило, это полая бесшовная труба определенного сечения и длины. Топливные рампы из алюминиевых сплавов в основном получают по технологии обработки металла под давлением, стальные – из круглого или листового проката нержавеющей стали. При производстве таких металлических рампы дополнительно используются сложные технологические операции по пробивке отверстий, формообразованию профиля, лазерной сварке, применению пластмассовых покрытий и т.п., которые значительно усложняют технологию и определяют конечную стоимость изделия.

1.4 Пластиковые материалы для топливных систем

Без пластиковых материалов производителям автомобилей было бы сложно разрабатывать топливные системы, которые одновременно выдерживали бы агрессивное топливо, уменьшали вес автомобиля, повышали ударопрочность и позволяли создавать сложные геометрические конструкции.

Применение пластиковых материалов в конструкции элементов топливных систем привело к изменению подходов к их проектированию. Например, пластиковые материалы были использованы в конструкции топливных баков с целью повышения химической стойкости и ударопрочности, а также для достижения более плотной компоновки в конструкции автомобиля по сравнению с традиционными конструкциями стальных баков. Однако в таких пластиковых баках температура топлива резко выросла, поскольку пластиковый материал является хорошим теплоизолятором, а более плотная компоновка уменьшила поток охлаждающего бак воздуха (таблица 3). В результате температура топлива в отдельных конструкциях в среднем достигла 65 °С по сравнению с примерно 40 °С в стальных баках и в определенных условиях поднимается до уровня

температуры в 120 °С и более. Высокие температуры в моторном отсеке также влияют на реактивность топлива.

Таблица 3 – Свойства пластиковых материалов, применяемых для изготовления элементов топливной системы [28]

Материал	Свойство
Ацеталь (Полиоксиметилен)	Стабильность размеров, химическая стойкость и низкая проницаемость топлива
Нейлон 6/6 (ПА-6, РА6, ПА-66, РА66)	Хорошие ударные и другие механические свойства
Высокотемпературный нейлон (HTN, PPA)	Более простая обработка и лучшая стабильность размеров, химическая стойкость и ударопрочность.
Нейлон 12 (РА12)	Экструдированные многослойные детали для обеспечения барьерных свойств, ударопрочности и низкой проницаемости
Алифатический поликетон	Ударная и термическая стойкость находится между ацеталем и нейлоном
Полифениленсульфид (ПФС, PPS)	Устойчивость к высоким температурам и химическому воздействию, стабильность размеров, устойчивость к эрозии и низкая проницаемость
Полиэтилен высокого давления (ПВД, HDPE)	Хорошая экономичность, а также ударопрочность, химическая стойкость к дорожным солям.
Полибутилентерефталат (ПБТ, PBT)	Стабильность размеров, но следует использовать там, где термостойкость и проницаемость не важны.

За последние несколько десятилетий экологические инициативы прогрессивно влияли на используемый пластик в автомобилях. Например, постоянное ужесточение ограничений на выбросы в результате испарения топлива из системы, введенные в 1970-х годах, приводило к постепенному изменению используемых полимеров для крышек топливных баков, клапанов, адсорберов, уплотнений и т.п. К концу 1990-х годов прогресс определил основные типы используемых пластиков для элементов системы. Следует отметить, что процесс ужесточения действующих норм продолжается, и вопросы с проницаемостью пластмасс, а также стабильностью размеров становятся с каждым годом более важными.

Важным моментом является рассмотрение свойств и сфер применения нейлонов или полиамидов, которые до недавнего времени рассматривались

автопроизводителями как основной материал для производства топливных рамп.

Полиамиды (ПА) – представляют собой высокомолекулярные полимеры, содержащие в основной цепи макромолекулы амидную группу. Соотношение метиленовых и амидных групп в составе ПА определяет такие основные свойства полимера, как температура плавления, водопоглощение, эластичность, морозостойкость.

Удачное сочетание высокой механической прочности и малой плотности с хорошими антифрикционными и диэлектрическими свойствами, химической стойкостью к маслам и бензину делают ПА одним из важнейших конструкционных материалов. Детали из ПА выдерживают нагрузки, близкие к нагрузкам, допустимым для цветных металлов и сплавов. Исследование антифрикционных свойств ПА, особенно наполненных, показало значительное превосходство над фторопластами, полиформальдегидом и поликарбонатом. При этом, чем выше давление, тем меньше коэффициент трения ПА.

Для изготовления автомобильных деталей нашли применение следующие ПА и их стеклонаполненные модификации – ПА-610, ПА-6, ПА-66, ПА-12, стеклонаполненные.

- ПА-610 представляет собой продукт поликондесации соли СГ (соли себациновой кислоты с гексаметилендиамином). По значению показателя текучести расплава и модуля упругости он превосходит практически все термопласты, а сочетание небольшого водопоглощения с хорошими прочностными свойствами и тепломорозостойкостью делает возможным использования ПА-610 в ответственных деталях антифрикционного назначения. Однако его применение ограничено высокой стоимостью.
- ПА-6 – продукт полимеризации капролактама. ПА-6 самый дешёвый материал из полиамидов. По механическим свойствам он

превосходит другие ПА, имеет хорошие антифрикционные свойства.

- ПА-66 (анид) – продукт поликондексации соли АГ (хим. название-полигексаметиленадипамид). По сравнению с другими ПА имеет высокую прочность, хорошую теплостойкость, антифрикционные и электроизоляционные свойства.
- ПА-12 – продукт гидролитической полимеризации додекалактама в присутствии кислых катализаторов. Этот материал имеет небольшую плотность, отличается незначительным водопоглощением. Свойства и размеры изделий из него отличаются стабильностью. ПА-12 хорошо работает на знакопеременный изгиб, это самый эластичный из рассматриваемых ПА, имеет хорошие антифрикционные и диэлектрические свойства. К недостаткам материала относят низкую теплостойкость по сравнению с другими ПА.
- Стеклонаполненные ПА, содержащие 20 – 30% стекловолокна. Механическая прочность и теплостойкость ПА, наполненных стекловолокном, увеличивается по сравнению с не наполненными в 2 – 3 раза. Значительно возрастает и сопротивление ползучести, усталостная прочность, износостойкость. В автомобилестроении стеклонаполненные ПА применяют для изготовления деталей с жёстким размерными допусками, работающих в интервале температур от минус 60 °С до плюс 150 °С, а также деталей, несущих нагрузки.

Пластмассы в топливных системах должны работать на стабильно высоком уровне в сложных условиях на протяжении всего срока службы автомобиля. Длительный контакт с топливом предъявляет к материалу ряд химических, физических, механических и термических свойств:

- химическая стойкость связана с изменением химической структуры или состава материала, что, как правило, приводит к снижению производительности систем;
- стабильность размеров является важным свойством, поскольку многие детали топливной системы имеют жесткие допуски. Этот фактор также важен там, где встречаются разные пластмассы или сочетаются пластик и металл, поскольку их разная размерная стабильность может влиять на уплотнения;
- механические свойства включают прочность на удар, растяжение и сжатие, а также удлинение и прочность на разрыв. Детали должны быть спроектированы так, чтобы сохранять достаточную целостность, выполнять свое предназначение в течение всего срока службы транспортного средства;
- коэффициент теплового расширения является одним из ряда наблюдаемых эффектов, связанных с температурой, которые включают скорость химических реакций при полимеризации и изменение механических свойств в процессе работы.

В настоящее время проницаемость пластиковых материалов выходит на передний план и интенсивно исследуется под давлением вводимых стандартов.

Проникновение пластмасс на автомобильный рынок возможно за счет внедрения композитных решений. Для удовлетворения будущих потребностей автомобильных топливных систем, особенно в мировом масштабе, производители пластмасс должны учитывать широкий спектр более агрессивных видов топлива, более длительный срок службы транспортных средств и более высокие температуры. Это означает, что пластмассы с более высокими эксплуатационными характеристиками должны работать с любым топливом в любых условиях.

Выводы первой главе.

Использование альтернативных источников топлива способствует сокращению энергопотребления, что ведет к уменьшению углеродных эмиссий, предотвращает загрязнение и стимулирует более широкое использование различных энергоресурсов. В сравнении с переходными источниками топлива, альтернативные предлагают лучшие показатели по экологическому влиянию, устойчивому развитию и энергоэффективности. Многие из них уже находят применение на практике, демонстрируя себя как перспективные энергоносители будущего.

Биотопливо представляет собой альтернативный вид энергоносителя для автотранспорта в обозримом и промежуточном будущем. Тем не менее, для экологически чистого изготовления биотоплива необходимо усовершенствование текущих технологий его производства.

2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе, с учетом рекомендаций по расчету основных параметров, предложенных в учебниках [1,2,3,4,5]. Результаты расчета представлены в виде таблиц и графиков, вынесенных на плакаты.

Для расчета стандартный двигатель ВАЗ-11186, работающий на бензине, и оценивались условия работы при работе на альтернативных агрессивных топливах, таких как метанол, этанол и Е85.

Состав и физико-технические характеристики топлив, для которых проводился тепловой расчет приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Физико-технические характеристики исследуемых топлив

Характеристика топлива	Бензин	Метанол	Этанол	Е85
ОЧ по исследовательскому методу	95	125	110	105
μ_t , кг/моль	115	32,04	46,069	56,4086
ρ , кг/м ³	760	791,8	789,34	787
Н _и , МДж/кг	43929,5	20235,95	27423,24	29795,384
Массовый элементарный состав, %				
– Углерод	85,5	37,485	52,1	56,94
– Водород	14,5	12,584	13,1	13,3
– Кислород	0	49,931	34,7	29,58
– Азот	0	0	0	0,105

2.1 Тепловой расчет при работе на бензине

В таблице 5 представлены регулировочные параметры работы, а в таблице 6 представлены термодимические характеристики используемых топлив.

Таблица 5 – Регулировочные характеристики двигателя при работе на бензине подаваемого на впускной клапан

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
Θ , ° ПКВ	20	24	28	32	35
α	1	1	1	1	1
ΔT_N , °С	5	5	5	5	5
ε	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
P_0 , МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
T_0 , К°	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
n_p	1,3751	1,3752	1,3754	1,3755	1,3754
n_d	1,3750	1,3752	1,3753	1,3754	1,3753
T_r , К	1070	1080	1100	1120	1130
ϕ_r , ° ПКВ	50	56	62	68	75
m	3	3	3	3	3
σ	1	1	1	1	1
δi	0,86	0,88	0,9	0,88	0,85
ξ	0,86	0,88	0,9	0,88	0,85

Таблица 6 – Термохимические характеристики при работе на бензине, метаноле, этаноле и E85

Параметр	Значение характеристики			
	Бензин при $\alpha=1$	Метанол при $\alpha=1$	Этанол при $\alpha=1$	E85 при $\alpha=1$
Н	0,145	0,20879	0,20879	0,20879
С	0,855	0,628461	0,628461	0,628461
О	0	0,007218602	0,007218602	0,007218602
S	0	0	0	0
N	0	0,15532603	0,15532603	0,15532603
m_r , кг/моль	115	18,14323	18,14323	18,14323
H_u	43929,500	42739,960	42739,960	42739,960
L_0 , кмоль возд./кг топлива	0,517	0,502	0,502	0,502
L_0 , кг возд./кг топлива	14,957	14,517	14,517	14,517
$M_s CO$, кмоль CO/кг топлива	0,0713	0,0524	0,0524	0,0524
MN_2O , кмоль H ₂ O/кг топлива	0,0725	0,1044	0,1044	0,1044
MN_2 , кмоль N ₂ /кг топлива	0,4093	0,3987	0,3987	0,7997
MO_2 , кмоль O ₂ /кг топлива	0	0	0	0
M_2 кмоль пр. сг./кг топлива	0,5531	0,5554	0,5554	1,0608
μ_0	1,0524	0,9976	0,9976	1,0023

Для удобства расчетов цикла для двигателя при работе на бензине подаваемого на впускной клапан представим данные в виде таблицы 7, индикаторные параметры в таблице 8, а эффективные параметры в таблице 9.

Таблица 7 – Расчет действительного цикла двигателя при работе на бензине

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
P_r , МПа	0,1038	0,1051	0,1076	0,1136	0,1180
P_B , кг/м ³	1,1882	1,1882	1,1882	1,1882	1,1882
$\omega_{вп}$, м/с	16,2472	38,6837	61,8940	96,7094	116,0512
P_a , МПа	0,0996	0,0979	0,0945	0,0867	0,0808
γ_r	0,0347	0,0349	0,0350	0,0383	0,0424
η_V	0,8450	0,8526	0,8633	0,8037	0,7500
T_a , К	332,9657	331,4197	330,1033	331,3278	333,6049
V_a , м ³ /кг	0,9163	0,9282	0,9564	1,0454	1,1273
P_c , МПа	2,4606	2,4191	2,3389	2,1482	2,0053
T_c , К	798,3870	795,0506	792,0775	795,2011	800,4796
n_2	1,1844	1,1839	1,1832	1,1850	0,3214
V_y , м ³ /кг	0,1208	0,1363	0,1571	0,1922	0,2256
P_y , МПа	1,6150	1,3697	1,1353	0,8923	0,7417
T_y , К	711,7663	680,7638	650,2941	625,6500	610,2094
q_z , кДж/кг	2288,1634	2341,0008	2393,9574	2333,2376	2244,9499
E_2 , МПа	51,4405	51,9578	792,0775	45,9782	41,0225

Таблица 8 – Индикаторные показатели действительного цикла двигателя при работе на бензине

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
δ	5,7545	5,4377	51,5636	4,8603	4,3557
P_z , МПа	4,9200	4,5936	5,1396	3,5357	2,7858
T_z , К	2719,7295	2721,9485	4,2191	2640,4456	2503,9012
P_b , МПа	0,6192	0,6187	2725,5447	0,5430	0,4854
T_b , К	1969,6932	1993,6608	0,6082	1970,8443	1900,2821
L_T , кДж	1,2547	1,2724	2019,3260	1,2514	1,2089
P_iT , МПа	1,5165	1,5183	1,2809	1,3258	1,1877
η_i	0,5233	0,5192	1,4833	0,4810	0,4617
g_i , г/кВт*ч	156,6072	157,8386	0,5009	170,3779	177,4796

Таблица 9 – Эффективные показатели действительного цикла двигателя при работе на бензине

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
P_M , МПа	0,0579	0,0910	0,1251	0,1764	0,2049
C_{II} , м/с	2,1168	5,0400	8,0640	12,6000	15,1200
P_e , МПа	1,4586	1,4273	1,3582	1,1495	0,9828
η_M	0,9618	0,9401	0,9156	0,8670	0,8275
η_e	0,5033	0,4881	0,4587	0,4170	0,3821
g_e , г/кВт*ч	162,8260	167,8963	178,6592	196,5216	214,4725
N_e , кВт	16,3055	37,9904	57,8397	76,4865	78,4778
G_T , кг/ч	2,6550	6,3784	10,3336	15,0312	16,8313
M_e , Н*м	185,3643	181,3908	172,6025	146,0784	124,9013

2.2 Тепловой расчет при работе на метаноле

В таблице 10 представлены регулировочные параметры работы при работе на метаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор.

Таблица 10 – Регулировочные характеристики двигателя при работе на метаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
Θ , ° ПКВ	20	24	28	32	35
α	1	1	1	1	1
ΔT_N , °С	3	3	3	3	3
ε	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
P_0 , МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
T_0 , К°	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
n_p	1,3758	1,3758	1,3759	1,3758	1,3756
n_d	1,3755	1,3758	1,3758	1,3756	1,3755
T_r , К	1080	1090	1100	1115	1140
ϕ_r , ° ПКВ	50	56	62	68	75
m	3	3	3	3	3
σ	1	1	1	1	1
δi	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
ξ	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Результаты расчетов цикла для двигателя при работе на метаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор представим

данные в виде таблицы 11, индикаторные параметры в таблице 12, а эффективные параметры в таблице 13.

Таблица 11 – Расчет действительного цикла двигателя при работе на метаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
P_r , МПа	0,1038	0,1051	0,1076	0,1136	0,1180
P_B , кг/м ³	1,1882	1,1882	1,1882	1,1882	1,1882
$\omega_{вп}$, м/с	16,2472	38,6837	61,8940	96,7094	116,0512
P_a , МПа	0,0996	0,0979	0,0945	0,0867	0,0808
γ_r	0,0289	0,0295	0,0310	0,0346	0,0376
η_V	0,9643	0,9486	0,9152	0,8321	0,7684
T_a , К	322,4117	321,8880	322,0071	324,1010	326,7358
V_a , м ³ /кг	0,9189	0,9336	0,9662	1,0590	1,1434
P_c , МПа	2,8667	2,8191	2,7249	2,5010	2,3346
T_c , К	806,6829	805,9629	806,2611	811,1076	817,5019
n_2	1,1862	1,1873	1,1883	0,3651	0,3214
V_y , м ³ /кг	0,1122	0,1281	0,1496	0,1851	0,2185
P_y , МПа	1,7966	1,5046	1,2321	0,9576	0,7903
T_y , К	710,0709	678,9327	649,1049	624,0684	608,2285
q_z , кДж/кг	2343,8587	2342,5607	2339,1318	2330,8321	2324,1704
E_2 , МПа	58,6683	57,7137	55,6841	50,6229	46,7503

Таблица 12 – Индикаторные показатели действительного цикла двигателя при работе на метаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
δ	6,0788	5,7226	5,3900	5,0803	4,5261
P_z , МПа	5,2638	4,7970	4,2948	3,6342	2,9155
T_z , К	2644,2900	2600,7438	2558,7222	2518,3461	2448,8572
P_b , МПа	0,6188	0,6046	0,5802	0,5258	0,4823
T_b , К	1889,4933	1875,9374	1863,0953	1851,0906	1833,7522
L_T , кДж	1,3165	1,3031	1,2865	1,2648	1,2347
P_iT , МПа	1,5692	1,5288	1,4584	1,3081	1,1827
η_i	0,5049	0,5001	0,4944	0,4878	0,4776
g_i , г/кВт*ч	352,3485	355,7594	359,8279	364,7001	372,5222

Таблица 13 – Эффективные показатели действительного цикла двигателя при работе на метаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
P_M , МПа	0,0579	0,0910	0,1251	0,1764	0,2049
c_p , м/с	2,1168	5,0400	8,0640	12,6000	15,1200
P_e , МПа	1,5112	1,4379	1,3333	1,1317	0,9778
η_m	0,9631	0,9405	0,9142	0,8652	0,8268
η_e	0,4863	0,4703	0,4520	0,4220	0,3948
g_e , г/кВт*ч	365,8526	378,2629	393,5971	421,5384	450,5667
N_e , кВт	16,8938	38,2707	56,7781	75,3064	78,0779
G_T , кг/ч	6,1807	14,4764	22,3477	31,7445	35,1793
M_e , Н*М	192,0528	182,7293	169,4347	143,8246	124,2649

2.3 Тепловой расчет при работе на этаноле

В таблице 14 представлены регулировочные параметры работы на этаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор.

Таблица 14 – Регулировочные характеристики двигателя при работе на этаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
Θ , ° ПКВ	22	25	30	33	35
α	1	1	1	1	1
ΔT_N , °С	4	4	4	4	4
ε	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
P_0 , МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
T_0 , К°	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
n_p	1,3757	1,3758	1,3759	1,3760	1,3759
n_d	1,3748	1,3747	1,3747	1,3744	1,3742
T_r , К	1120	1130	1150	1180	1200
ϕ_r , ° ПКВ	52	58	64	68	70
m	3	3	3	3	3
σ	1	1	1	1	1
δ_i	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
ξ	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94

Для удобства расчетов цикла для двигателя при работе на этаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор представим

данные в виде таблицы 15, индикаторные параметры в таблице 16, а эффективные параметры в таблице 17.

Таблица 15 – Расчет действительного цикла двигателя при работе на этаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
P_r , МПа	0,1038	0,1051	0,1076	0,1136	0,1180
P_B , кг/м ³	1,1882	1,1882	1,1882	1,1882	1,1882
$\omega_{вп}$, м/с	16,2472	38,6837	61,8940	96,7094	116,0512
P_a , МПа	0,0996	0,0979	0,0945	0,0867	0,0808
γ_r	0,0301	0,0304	0,0316	0,0343	0,0382
η_V	0,9133	0,9099	0,8890	0,8283	0,7571
T_a , К	326,4318	325,2219	324,6933	325,6784	328,1408
V_a , м ³ /кг	0,9417	0,9548	0,9862	1,0772	1,1624
P_c , МПа	2,8618	2,8115	2,7176	2,4937	2,3272
T_c , К	815,3460	812,1257	810,8058	812,6701	818,4147
n_2	1,1835	1,1840	1,1847	0,4421	0,4107
V_y , м ³ /кг	0,1032	0,1166	0,1395	0,1618	0,1855
P_y , МПа	2,0818	1,7625	1,3927	1,1764	1,0102
T_y , К	747,5933	715,0563	675,7358	662,2615	652,0593
q_z , кДж/кг	2626,1631	2625,2594	2622,3046	2615,3470	2547,7706
E_2 , МПа	64,1389	63,2404	61,1591	55,8427	50,4107

Таблица 16 – Индикаторные показатели при работе на этаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
δ	6,4586	6,0788	6,0788	5,3900	4,9338
P_z , МПа	6,0705	5,5376	5,3438	4,2085	3,4331
T_z , К	2718,1449	2671,0958	2662,6381	2583,9826	2486,1093
P_b , МПа	0,6675	0,6535	0,6299	0,5712	0,5163
T_b , К	1930,4002	1916,2451	1907,8617	1890,1939	1844,6013
L_T , кДж	1,4556	1,4508	1,4490	1,4454	1,3668
P_iT , МПа	1,6928	1,6642	1,6092	1,4696	1,2878
η_i	0,5189	0,5121	0,5068	0,4967	0,4762
g_i , г/кВт*ч	5,4913	5,5648	5,6229	5,7368	5,9839

Таблица 17 – Эффективные показатели действительного цикла двигателя при работе на этаноле стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
P_M , МПа	0,1140	0,1485	0,1842	0,2377	0,2674
C_p , м/с	2,1168	5,0400	8,0640	12,6000	15,1200
P_e , МПа	1,5789	1,5158	1,4251	1,2319	1,0203
η_m	0,9327	0,9108	0,8856	0,8383	0,7923
η_e	0,4840	0,4664	0,4488	0,4164	0,3773
g_e , г/кВт*ч	5,8877	6,1099	6,3496	6,8436	7,5521
N_e , кВт	17,6499	40,3443	60,6892	81,9730	81,4735
G_T , кг/ч	0,1039	0,2465	0,3853	0,5610	0,6153
M_e , Н*М	200,6483	192,6298	181,1060	156,5569	129,6691

2.4 Тепловой расчет при работе на E85 (85% этанола и 15% бензина)

В таблице 18 представлены регулировочные параметры работы E85 стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор.

Таблица 18 – Регулировочные характеристики двигателя при работе E85 стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
Θ , ° ПКВ	16	20	25	27	29
α	2	2	2	2	2
ΔT_N , °С	4	4	4	4	4
ε	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
P_0 , МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
T_0 , К°	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
n_p	1,3757	1,3758	1,3759	1,3760	1,3759
n_d	1,3748	1,3747	1,3747	1,3744	1,3742
T_r , К	840	840	850	865	890
ϕ_r , ° ПКВ	44	50	55	61	66
m	3	3	3	3	3
σ	1	1	1	1	1
δ_i	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
ξ	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88

Для удобства расчетов цикла для двигателя при работе на E85 стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор представим

данные в виде таблицы 19, индикаторные параметры в таблице 20, а эффективные параметры в таблице 21.

Таблица 19 – Расчет действительного цикла двигателя при работе E85 стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор.

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
P_r , МПа	0,1038	0,1051	0,1076	0,1136	0,1180
P_B , кг/м ³	1,1882	1,1882	1,1882	1,1882	1,1882
$\omega_{вп}$, м/с	16,2472	38,6837	61,8940	96,7094	116,0512
P_a , МПа	0,0998	0,0987	0,0966	0,0916	0,0879
γ_r	0,0306	0,0310	0,0341	0,0377	0,0404
η_V	0,9482	0,9372	0,8779	0,7972	0,7418
T_a , К	314,1095	314,7052	317,1078	321,3868	324,4610
V_a , м ³ /кг	0,9111	0,9310	1,0012	1,0402	1,1039
P_c , МПа	2,8556	2,7985	2,6164	2,3619	2,2420
T_c , К	783,2278	784,3301	788,5826	797,0793	802,9370
n_2	1,1854	1,1861	1,1863	0,4742	0,4421
V_y , м ³ /кг	0,0929	0,1047	0,1295	0,1471	0,1658
P_y , МПа	2,2946	1,9648	1,5163	1,2120	1,0596
T_y , К	737,9488	712,3508	679,9613	665,2011	655,5470
q_z , кДж/кг	2305,1395	2304,1479	2297,2784	2289,2331	2283,3921
E_2 , МПа	58,1900	56,9228	52,7734	50,6165	47,5742

Таблица 20 – Индикаторные показатели при работе на E85 стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор.

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
δ	6,8615	6,2657	6,4586	5,8977	5,5534
P_z , МПа	6,1161	5,3376	5,1318	4,3229	3,7777
T_z , К	2612,3831	2551,1509	2559,5382	2523,3700	2485,9386
P_b , МПа	0,6237	0,6054	0,5613	0,5265	0,4938
T_b , К	1827,9671	1812,9808	1808,1315	1812,6656	1804,5200
L_T , кДж	1,3059	1,2905	1,3016	1,2650	1,2474
P_iT , МПа	1,5698	1,5181	1,4238	1,3320	1,2376
η_i	0,4959	0,4852	0,4859	0,4768	0,4761
g_i , г/кВт*ч	306,4692	313,2314	312,8257	318,7783	319,2360

Таблица 21 – Эффективные показатели действительного цикла двигателя при работе на E85 стехиометрического состава при подаче во впускной коллектор

Параметр	Значение характеристики				
	840	2000	3200	5000	6000
n , мин ⁻¹	840	2000	3200	5000	6000
P_M , МПа	0,1140	0,1485	0,2020	0,2496	0,2674
C_p , м/с	2,1168	5,0400	9,5760	13,6080	15,1200
P_e , МПа	1,4558	1,3697	1,2218	1,0824	0,9702
η_m	0,9274	0,9022	0,8581	0,8126	0,7839
η_e	0,4599	0,4378	0,4169	0,3874	0,3732
g_e , г/кВт*ч	330,4627	347,1857	364,5432	392,2820	407,2283
N_e , кВт	16,2747	36,4554	61,7891	77,7843	77,4683
G_T , кг/ч	5,3782	12,6568	22,5248	30,5134	31,5473
M_e , Н*м	185,0141	174,0619	155,2742	137,5528	123,2946

Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы

Тепловой расчет показал значительное влияние вида топлива на мощностные и экономические характеристики работы. Получено что наилучшими показателями по мощности обладает бензин, затем идет E85, затем этанол и самый не эффективный это метанол.

3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

Кинематический расчет для центрального кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя (радиус кривошипа 37,4 мм, а длина шатуна 132,4 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала 6000 мин⁻¹.

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Результаты кинематического расчета

$\varphi_{кв}$, град	S_x , мм	V_x , м/с	W_{x1} , м/с ²	W_{x2} , м/с ²	W_x , м/с ²	$\varphi_{кв}$, град	S_x , мм	V_x , м/с	W_{x1} , м/с ²	W_{x2} , м/с ²	W_x , м/с ²
0	0,00	0	15672,9	4703,064188	20376	180	79,40	2E-15	-15672,9	4703,064188	-10970
10	0,78	5,612	15434,8	4419,434712	19854,3	190	78,98	-3,05	-15434,8	4419,434712	-11015
20	3,09	10,94	14727,7	3602,756187	18330,5	200	77,70	-6,13	-14727,7	3602,756187	-11125
30	6,81	15,71	13573,2	2351,532094	15924,7	210	75,57	-9,23	-13573,2	2351,532094	-11222
40	11,75	19,72	12006,2	816,6785256	12822,8	220	72,57	-12,3	-12006,2	816,6785256	-11189
50	17,68	22,79	10074,4	-816,6785256	9257,69	230	68,71	-15,4	-10074,4	-816,6785256	-10891
60	24,32	24,84	7836,47	-2351,532094	5484,93	240	64,02	-18,4	-7836,47	-2351,532094	-10188
70	31,38	25,85	5360,46	-3602,756187	1757,7	250	58,54	-21	-5360,46	-3602,756187	-8963,2
80	38,58	25,85	2721,58	-4419,434712	-1697,9	260	52,37	-23,3	-2721,58	-4419,434712	-7141
90	45,66	24,94	9,6E-13	-4703,064188	-4703,1	270	45,66	-24,9	-2,9E-12	-4703,064188	-4703,1
100	52,37	23,29	-2721,58	-4419,434712	-7141	280	38,58	-25,8	2721,58	-4419,434712	-1697,9
110	58,54	21,03	-5360,46	-3602,756187	-8963,2	290	31,38	-25,8	5360,46	-3602,756187	1757,7
120	64,02	18,36	-7836,47	-2351,532094	-10188	300	24,32	-24,8	7836,47	-2351,532094	5484,93
130	68,71	15,42	-10074,4	-816,6785256	-10891	310	17,68	-22,8	10074,4	-816,6785256	9257,69
140	72,57	12,35	-12006,2	816,6785256	-11189	320	11,75	-19,7	12006,2	816,6785256	12822,8
150	75,57	9,231	-13573,2	2351,532094	-11222	330	6,81	-15,7	13573,2	2351,532094	15924,7
160	77,70	6,126	-14727,7	3602,756187	-11125	340	3,09	-10,9	14727,7	3602,756187	18330,5
170	78,98	3,051	-15434,8	4419,434712	-11015	350	0,78	-5,61	15434,8	4419,434712	19854,3
180	79,40	2E-15	-15672,9	4703,064188	-10970	360	0,00	-0	15672,9	4703,064188	20376

По результатам кинематического расчета мы можем определить инерционные силы в динамическом расчете.

3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала 6000 мин^{-1} , для условий работы двигателя на бензине при работе на стехиометрическом составе при работе на этаноле.

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 6 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения.

Проведем сравнение результатов динамического расчета в таблицах 23 и 24.

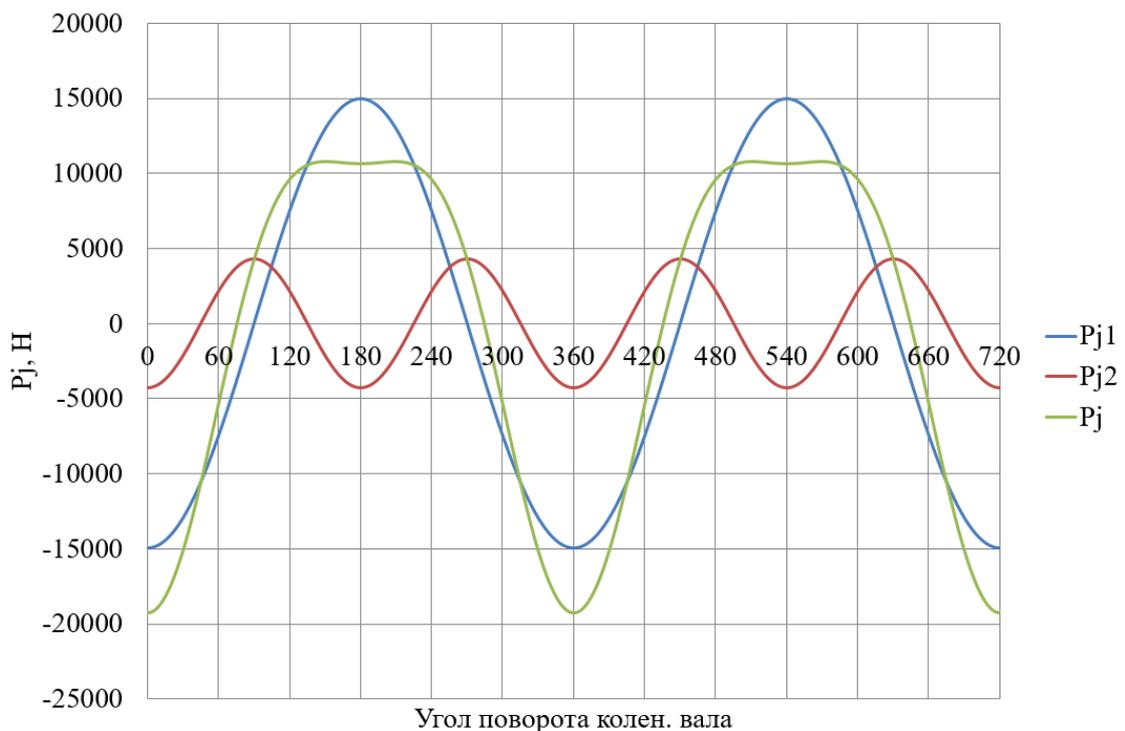


Рисунок 6 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

Таблица 23 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец и крутящий момент двигателя в сравнении при работе на бензине при впрыске в коллектор и при работе на этаноле

Ф _{кв}	N, Н		K, Н		Z, Н		T, Н		Mкр.цп	
	Бензин	Этанол	Бензин	Этанол	Бензин	Этанол	Бензин	Этанол	Бензин	Этанол
0	0	0	-12439	-12419	-12438,9	-12419	0	0	0	0
10	-638,5	-638,5	-12253	-12253	-11939,3	-11939,3	-2753,5	-2753,5	-109,3	-109,3
20	-1166	-1166	-11365	-11365	-10224	-10224	-4962,4	-4962,4	-197	-197
30	-1492	-1492	-9947	-9947	-7770,33	-7770,33	-6209,4	-6209,4	-246,5	-246,5
40	-1560	-1560	-8090	-8090	-5077,8	-5077,8	-6297,7	-6297,7	-250	-250
50	-1360	-1360	-5917	-5917	-2659,63	-2659,63	-5285,7	-5285,7	-209,8	-209,8
60	-929,1	-929,1	-3575	-3575	-921,578	-921,578	-3454,5	-3454,5	-137,1	-137,1
70	-345,1	-345,1	-1224	-1224	-77,2994	-77,2994	-1221,3	-1221,3	-48,48	-48,48
80	290,2	290,2	982,11	982,11	-122,896	-122,896	974,39	974,39	38,68	38,68
90	873	873	2909,3	2909,3	-873,022	-873,022	2775,3	2775,3	110,2	110,2
100	1319	1319	4464,9	4464,9	-2040,12	-2040,12	3971,6	3971,6	157,7	157,7
110	1581	1581	5606,9	5606,9	-3325,55	-3325,55	4514,2	4514,2	179,2	179,2
120	1649	1649	6346,1	6346,1	-4492,28	-4492,28	4482,5	4482,5	178	178
130	1549	1549	6738,3	6738,3	-5401,85	-5401,85	4028	4028	159,9	159,9
140	1325	1325	6869,3	6869,3	-6015,02	-6015,02	3317,6	3317,6	131,7	131,7
150	1026	1026	6837,3	6837,3	-6367,19	-6367,19	2491,5	2491,5	98,91	98,91
160	691,4	691,4	6736,4	6736,4	-6533,19	-6533,19	1642,1	1642,1	65,19	65,19
170	346,1	346,1	6642,9	6642,9	-6593,17	-6593,17	811,07	811,07	32,2	32,2
180	2E-13	2E-13	6606	6606	-6606,02	-6606,02	8E-13	8E-13	3E-14	3E-14
190	-346,3	-346,3	6645,2	6645,8	-6595,52	-6596,1	-811,36	-811,43	-32,21	-32,21
200	-692,5	-692,6	6747,2	6748,5	-6543,61	-6544,88	-1644,8	-1645,1	-65,3	-65,31
210	-1030	-1030	6863,2	6865,5	-6391,33	-6393,41	-2501	-2501,8	-99,29	-99,32
220	-1334	-1335	6918,6	6922	-6058,21	-6061,21	-3341,4	-3343	-132,7	-132,7
230	-1568	-1569	6821,4	6826,4	-5468,45	-5472,5	-4077,6	-4080,6	-161,9	-162
240	-1683	-1685	6476,5	6483,8	-4584,58	-4589,77	-4574,6	-4579,8	-181,6	-181,8
250	-1636	-1639	5802,9	5813,5	-3441,77	-3448,1	-4672	-4680,6	-185,5	-185,8
260	-1404	-1409	4751,7	4767,3	-2171,14	-2178,27	-4226,7	-4240,6	-167,8	-168,3
270	-997,1	-1004	3322,7	3346	-997,054	-1004,05	-3169,6	-3191,8	-125,8	-126,7
280	-465,3	-475,9	1574,6	1610,3	-197,038	-201,499	-1562,2	-1597,6	-62,02	-63,42
290	104,9	89,03	-372,2	-315,7	-23,5083	-19,9442	371,41	315,1	14,75	12,51
300	607,8	583,6	-2339	-2246	-602,867	-578,867	2259,8	2169,8	89,71	86,14
310	940,6	903,5	-4092	-3931	-1839,2	-1766,73	3655,2	3511,1	145,1	139,4
320	1030	973,9	-5342	-5049	-3353,11	-3169,13	4158,7	3930,5	165,1	156
330	862,3	780,8	-5747	-5204	-4489,92	-4065,32	3588	3248,7	142,4	129
340	485,6	403	-4731	-3927	-4256,38	-3532,42	2065,9	1714,5	82,02	68,07
350	33,21	-25,62	-637,4	491,66	-621,115	479,0886	143,25	-110,49	5,687	-4,386
360	-6E-13	-8E-13	7699,6	10549	7699,634	10548,96	-2E-12	-3E-12	-7E-14	-1E-13
370	809,4	1070	15533	20530	15135,9	20005,08	3490,8	4613,7	138,6	183,2
380	1652	2084	16099	20303	14483,34	18265,46	7029,8	8865,6	279,1	352
390	1703	2017	11350	13445	8866,879	10503,07	7085,7	8393,2	281,3	333,2
400	1349	1573	6995,6	8152,8	4390,97	5117,298	5445,9	6346,7	216,2	252
410	1177	1352	5119,2	5880,6	2301,006	2643,217	4573	5253,1	181,5	208,5
420	1245	1384	4790,8	5323,9	1234,9	1372,302	4628,9	5144	183,8	204,2
430	1505	1619	5336,4	5739,8	337,0914	362,5725	5325,8	5728,4	211,4	227,4
440	1859	1955	6290	6614,1	-787,096	-827,651	6240,6	6562,1	247,8	260,5
450	2198	2280	7326,2	7598,6	-2198,41	-2280,17	6988,5	7248,5	277,4	287,8
460	2433	2503	8233,2	8470,4	-3761,92	-3870,3	7323,5	7534,5	290,7	299,1
470	2508	2568	8894,8	9107	-5275,65	-5401,51	7161,4	7332,2	284,3	291,1
480	2410	2461	9274,4	9468,5	-6565,12	-6702,55	6550,8	6687,9	260,1	265,5
490	2160	2202	9396,7	9577,7	-7533,01	-7678,15	5617,1	5725,3	223	227,3
500	1799	1832	9327,1	9498,9	-8167,22	-8317,62	4504,6	4587,6	178,8	182,1
510	1373	1391	9150,1	9273,3	-8520,99	-8635,72	3334,3	3379,2	132,4	134,2
520	872,8	885,4	8504,3	8626,8	-8247,74	-8366,51	2073,1	2103	82,3	83,49
530	410,3	416,7	7875	7997	-7816,07	-7937,14	961,51	976,4	38,17	38,76
540	8E-13	8E-13	7308,4	7430,2	-7308,36	-7430,18	3E-12	3E-12	1E-13	1E-13
550	-355,2	-361,6	6817,4	6939,3	-6766,34	-6887,41	-832,37	-847,27	-33,05	-33,64
560	-703,9	-705,6	6858,5	6874,8	-6651,58	-6667,37	-1671,9	-1675,9	-66,37	-66,53
570	-1044	-1047	6960,1	6976,5	-6481,56	-6496,81	-2536,3	-2542,3	-100,7	-100,9
580	-1349	-1352	6993	7009,5	-6123,39	-6137,84	-3377,3	-3385,3	-134,1	-134,4

Продолжение таблицы 23

590	-1578	-1581	6863,1	6879,7	-5501,88	-5515,22	-4102,5	-4112,5	-162,9	-163,3
600	-1682	-1686	6471,9	6488,6	-4581,29	-4593,16	-4571,3	-4583,1	-181,5	-182
610	-1617	-1621	5733,5	5750,4	-3400,62	-3410,63	-4616,1	-4629,7	-183,3	-183,8
620	-1357	-1362	4592	4609	-2098,2	-2105,94	-4084,7	-4099,7	-162,2	-162,8
630	-911,2	-916,3	3036,6	3053,6	-911,22	-916,314	-2896,7	-2912,9	-115	-115,6
640	-327,8	-332,8	1109,2	1126,2	-138,802	-140,923	-1100,5	-1117,3	-43,69	-44,36
650	309,4	304,6	-1097	-1080	-69,3045	-68,2384	1095	1078,1	43,47	42,8
660	896,4	892,1	-3450	-3433	-889,164	-884,841	3333	3316,7	132,3	131,7
670	1331	1328	-5792	-5776	-2603,55	-2596,07	5174,2	5159,3	205,4	204,8
680	1537	1533	-7966	-7950	-5000,12	-4989,76	6201,4	6188,6	246,2	245,7
690	1474	1471	-9824	-9807	-7674,38	-7661,59	6132,8	6122,5	243,5	243,1
700	1154	1152	-11243	-11226	-10114,1	-10099,5	4909,1	4902	194,9	194,6
710	632,1	631,3	-12131	-12115	-11820,8	-11805	2726,2	2722,6	108,2	108,1
720	2E-12	2E-12	-12436	-12419	-12436,2	-12419	6E-12	6E-12	2E-13	2E-13

В таблице 24 приведены силы, действующие на поршневой палец и крутящий момент двигателя в сравнении при работе на бензине при впрыске в коллектор и при работе на этаноле

Таблица 24 – Силы, действующие на шатунную и коренные шейки коленчатого двигателя, в сравнении при работе на бензине при впрыске в коллектор и при работе на этаноле

Ф _{кв}	Рш.ш., Н		Рк.ш1(5), Н		Рк.ш2(4), Н		Рк.ш3, Н	
	Бензин	Этанол	Бензин	Этанол	Бензин	Этанол	Бензин	Этанол
0	20239,84	20220,00	15293,0	15283,1	9096,5	9063,0	23750,4	23773,1
10	19931,42	19931,42	15106,1	15106,1	8773,1	8759,1	23696,7	23719,1
20	18695,57	18695,57	14400,9	14400,9	7464,7	7459,1	23641,9	23664,1
30	16763,73	16763,73	13325,5	13325,5	5817,7	5829,3	23586,2	23608,0
40	14336,13	14336,13	12031,8	12031,8	4730,3	4769,1	23529,4	23550,9
50	11720,18	11720,18	10733,8	10733,8	4829,9	4888,7	23471,7	23492,8
60	9381,70	9381,70	9689,5	9689,5	5506,0	5570,1	23413,2	23433,9
70	7972,38	7972,38	9132,6	9132,6	5923,9	5988,6	23353,8	23374,2
80	7983,56	7983,56	9148,0	9148,0	5813,8	5878,5	23293,7	23313,7
90	9107,16	9107,16	9610,8	9610,8	5318,5	5382,7	23232,9	23252,4
100	10612,30	10612,30	10287,1	10287,1	4790,5	4851,5	23171,4	23190,7
110	12007,41	12007,41	10971,0	10971,0	4572,5	4624,9	23109,4	23128,3
120	13084,99	13084,99	11539,4	11539,4	4740,6	4781,4	23047,0	23065,4
130	13803,60	13803,60	11945,5	11945,5	5103,5	5134,6	22984,1	23002,1
140	14208,74	14208,74	12194,4	12194,4	5457,0	5481,7	22920,9	22938,5
150	14385,57	14385,57	12320,3	12320,3	5710,3	5731,5	22857,5	22874,9
160	14427,93	14427,93	12367,4	12367,4	5861,6	5881,0	22794,2	22811,2
170	14416,99	14416,99	12376,8	12376,8	5945,8	5964,2	22731,0	22747,6
180	14407,00	14407,00	12376,6	12376,6	5997,1	6015,0	22667,8	22684,0
190	14419,34	14419,93	12378,0	12378,3	6030,3	6048,2	22604,9	22620,7
200	14438,58	14439,88	12372,7	12373,4	6030,9	6049,2	22542,4	22557,8
210	14410,99	14413,18	12332,8	12333,9	5953,3	5972,7	22480,2	22495,2
220	14256,30	14259,60	12217,4	12219,0	5736,1	5758,0	22418,7	22433,2
230	13881,81	13886,57	11982,5	11984,8	5329,9	5356,2	22357,7	22371,9
240	13203,37	13210,04	11593,7	11596,8	4738,3	4771,9	22297,6	22311,3
250	12174,86	12183,99	11044,3	11048,3	4065,5	4109,3	22238,3	22251,6
260	10830,87	10842,87	10376,6	10381,5	3527,3	3582,4	22180,1	22192,9
270	9351,55	9365,68	9702,4	9707,7	3308,3	3370,4	22122,9	22135,3
280	8149,16	8160,39	9205,3	9209,0	3295,8	3359,6	22066,9	22078,8
290	7833,30	7827,27	9087,2	9084,9	3179,2	3245,5	22012,3	22023,8
300	8702,37	8656,21	9442,8	9425,6	2890,1	2956,7	21959,1	21970,1
310	10309,87	10191,62	10158,9	10110,5	2910,3	2938,3	21907,4	21918,0

Продолжение таблицы 24

320	11904,14	11653,00	10949,4	10837,8	3681,0	3584,7	21857,4	21867,5
330	12803,91	12302,97	11459,8	11224,4	4553,3	4221,0	21809,1	21818,8
340	12233,07	11462,35	11249,3	10873,6	4338,0	3760,5	21762,7	21771,9
350	8423,31	7322,73	9384,4	8834,2	2049,8	2307,2	21718,3	21727,0
360	101,35	2747,98	5223,7	3799,1	8284,6	11103,3	21675,8	21684,1
370	8123,20	13047,09	2305,0	2486,9	15530,5	20395,2	21635,5	21643,3
380	9699,10	13715,09	3963,6	4433,2	14798,9	18581,7	21597,4	21604,7
390	7165,44	8817,46	5838,0	5676,2	9142,2	10781,8	21561,5	21568,4
400	6425,43	6890,81	7397,5	7246,7	4653,3	5383,8	21528,0	21534,5
410	7152,73	7361,87	8246,4	8184,8	2548,0	2898,8	21497,0	21502,9
420	8033,69	8233,35	8767,1	8772,9	1452,4	1609,3	21468,4	21473,9
430	9169,17	9388,51	9294,6	9342,2	579,0	648,4	21442,3	21447,3
440	10616,01	10840,41	9968,1	10038,7	808,7	864,4	21418,8	21423,4
450	12199,49	12416,52	10756,2	10837,6	2198,1	2279,0	21398,0	21402,0
460	13687,02	13891,99	11550,3	11635,4	3770,7	3875,1	21379,7	21383,3
470	14909,18	15101,90	12246,5	12331,9	5291,2	5412,2	21364,2	21367,3
480	15789,17	15971,25	12782,9	12867,0	6582,2	6714,4	21351,3	21354,0
490	16330,43	16504,01	13143,6	13226,1	7546,5	7686,3	21341,2	21343,3
500	16591,42	16758,73	13348,6	13429,7	8173,3	8317,9	21333,7	21335,4
510	16659,06	16780,48	13437,9	13497,6	8516,7	8625,5	21328,9	21330,1
520	16182,06	16303,68	13238,1	13298,4	8238,5	8349,7	21326,9	21327,6
530	15646,62	15768,38	12990,5	13051,3	7807,0	7918,1	21327,5	21327,7
540	15109,34	15231,16	12727,7	12788,6	7307,7	7416,3	21330,7	21330,5
550	14591,09	14712,81	12463,7	12524,4	6786,5	6890,0	21336,6	21335,8
560	14548,95	14565,09	12427,5	12435,5	6676,8	6679,0	21345,0	21343,8
570	14505,99	14522,05	12379,5	12387,4	6519,4	6519,1	21356,0	21354,3
580	14328,10	14344,02	12252,2	12259,9	6200,9	6196,8	21369,4	21367,2
590	13921,10	13936,77	12001,1	12008,5	5679,4	5669,0	21385,3	21382,6
600	13199,15	13214,39	11591,8	11598,8	4984,6	4964,2	21403,5	21400,3
610	12115,47	12129,90	11018,3	11024,6	4281,7	4246,1	21424,1	21420,4
620	10708,79	10721,71	10326,6	10331,9	3881,8	3828,8	21446,9	21442,6
630	9181,14	9191,09	9638,6	9642,3	3990,6	3927,4	21471,8	21467,1
640	8015,69	8020,11	9159,5	9161,1	4375,3	4310,5	21498,9	21493,6
650	7946,09	7942,73	9124,6	9123,6	4631,1	4567,4	21527,9	21522,2
660	9307,37	9297,54	9662,9	9659,4	4631,4	4569,2	21558,9	21552,6
670	11620,10	11606,79	10693,0	10687,6	4748,1	4691,9	21591,8	21585,0
680	14224,12	14209,20	11981,8	11975,1	5623,4	5581,0	21626,4	21619,1
690	16646,25	16630,59	13269,9	13262,5	7291,7	7262,7	21662,8	21655,0
700	18575,55	18559,55	14342,2	14334,4	9123,6	9102,8	21700,8	21692,4
710	19810,30	19794,15	15045,8	15037,8	10458,2	10441,7	21740,4	21731,5
720	20237,20	20220,00	15291,7	15283,1	10867,0	10851,1	21781,4	21772,0

На рисунке 7 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах. На рисунке 8 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах.

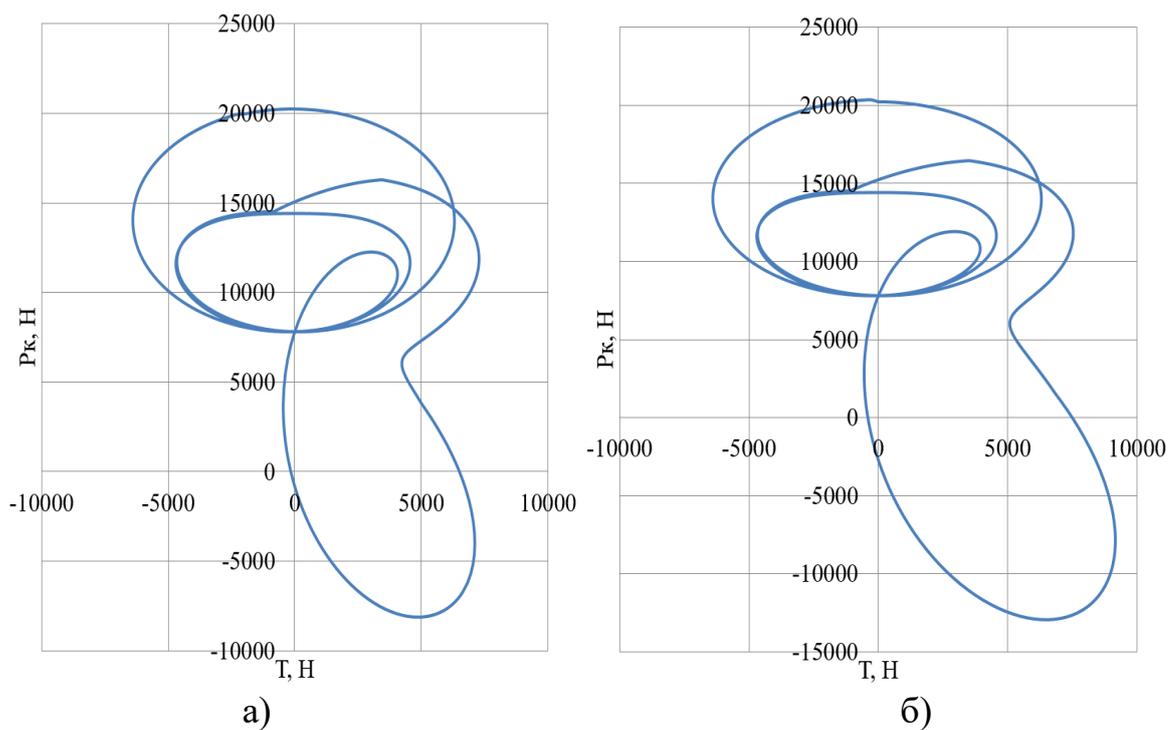


Рисунок 7 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах: (а) при работе на биогазе при впрыске на клапан; (б) при работе на биогазе при впрыске непосредственно в цилиндр двигателя

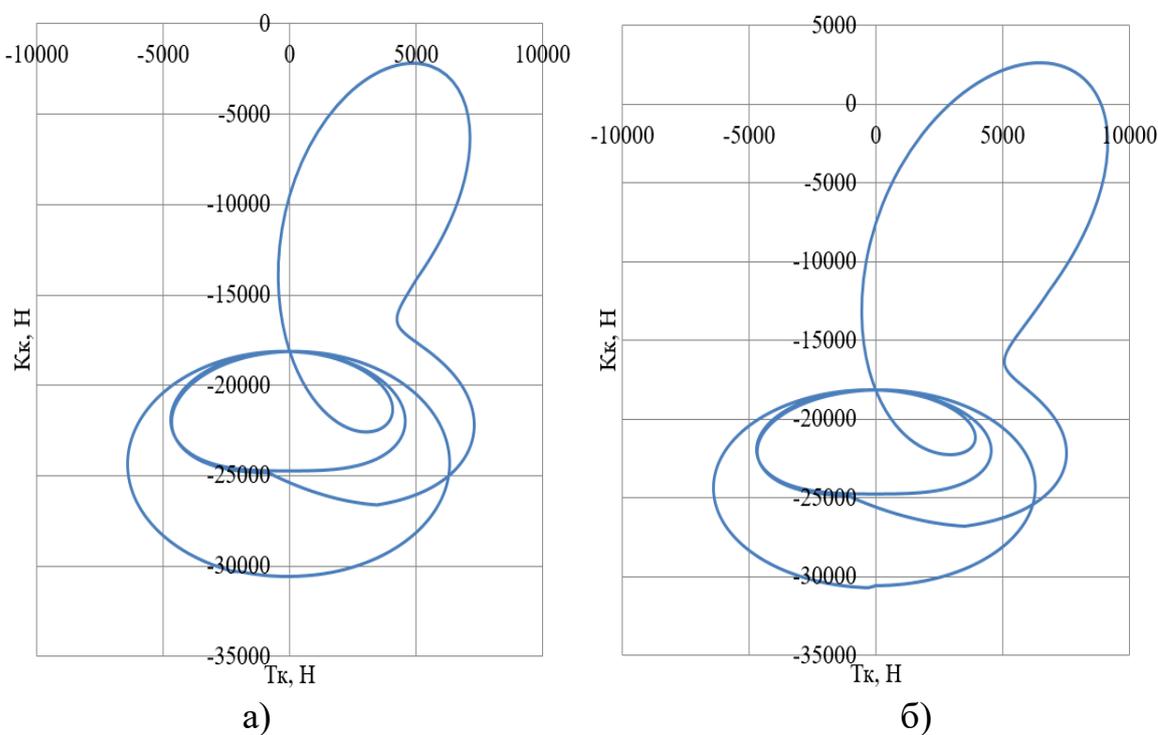


Рисунок 8 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах: (а) при работе на биогазе при впрыске на клапан; (б) при работе на биогазе при впрыске непосредственно в цилиндр двигателя

4 Анализ модернизированного корпуса топливной рампы

Для анализа модернизированного корпуса топливной рампы был произведён прочностной расчёт корпуса топливной рампы в программе Компас-3D v19, при помощи системы прочностного анализа АРМ-FEM.

Расчёт проводится при помощи метода конечных элементов (КЭ). Суть данного метода заключается в разбиении тела на множество подобластей, связанных между собой в точках соприкосновения, в которых интересующий нас параметр изменяется методом поиска решения дифференциальных уравнений.

Существует 2 основных типа построения сетки: на основе тетраэдрических элементов (tet) и на основе гексаэдрических элементов (hex). Отличаются данные типы точностью результатов, так, если интересующая нас модель имеет сложную геометрию, то лучше выбрать tet-элементы, а при простой конструкции hex-элементы дадут более точный результат. В нашем случае будет использована сетка на основе тетраэдрических элементов, так как модернизированный корпус топливной рампы имеет сложную конструкцию.

Для создания сетки конечных элементов необходимо задать параметры для отдельных подобластей, с целью получения удовлетворительного результата при минимальных затратах ресурсов вычислительной системы. Более подробно эти параметры представлены в таблице 25.

3-D модель корпуса топливной рампы с сеткой конечных элементов представлена на рисунках 9 и 10.

Таблица 25 – Параметры разбиения модели сеткой конечных элементов

Наименование	Значение
Тип элемнтов	4-узловые тетраэдры
Длина стороны элемента, мм	4
Максимальный коэф. сгущения на поверхности	1,2
Коэф. разрежения в объёме	1,5
Количество конечных элементов	38894

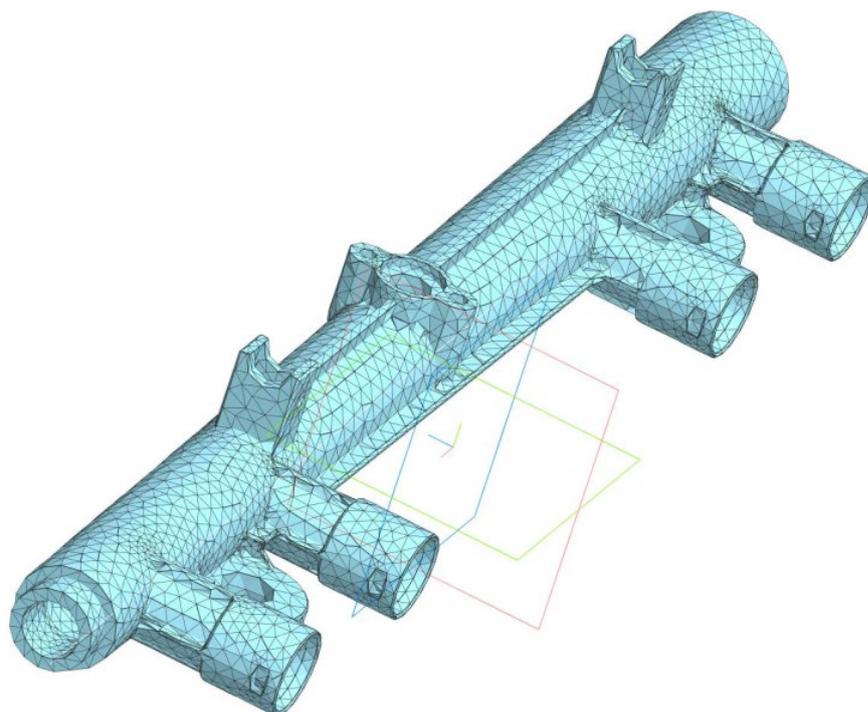


Рисунок 9 – Корпус топливной рампы с сеткой КЭ (вид спереди)

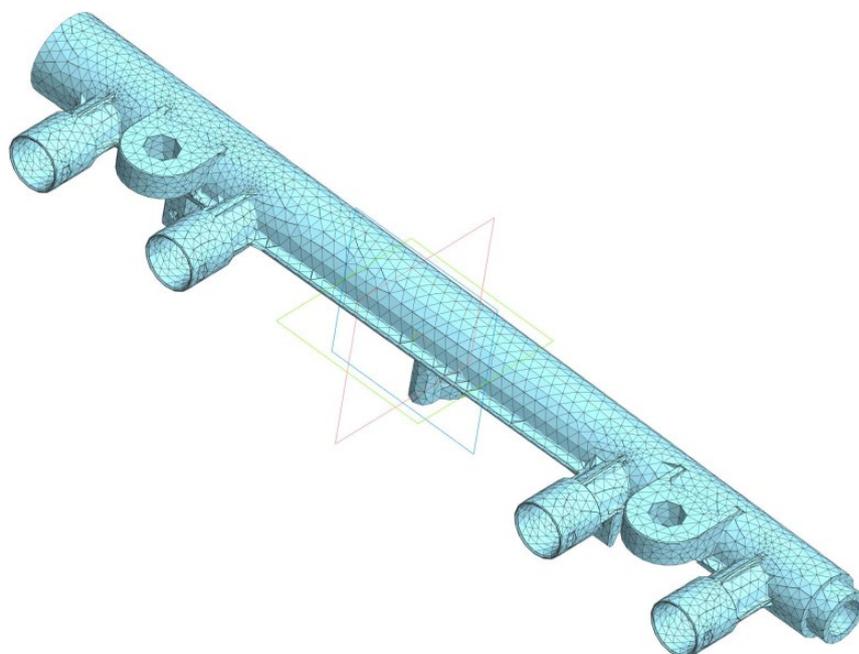


Рисунок 10 – Корпус топливной рампы с сеткой КЭ (вид сзади)

При заданных параметрах сетки конечных элементов, можно увидеть эпюру напряжений (рисунок 11), которая позволяет построить результирующие напряжения для динамического, нелинейного и статического исследований на ударную нагрузку, а также эпюру перемещений (рисунок 12), с помощью которой можно увидеть результаты перемещения и силы реакции для статического, динамического и нелинейного исследований. Результаты, полученные в ходе данного расчёта приведены в таблице 26.

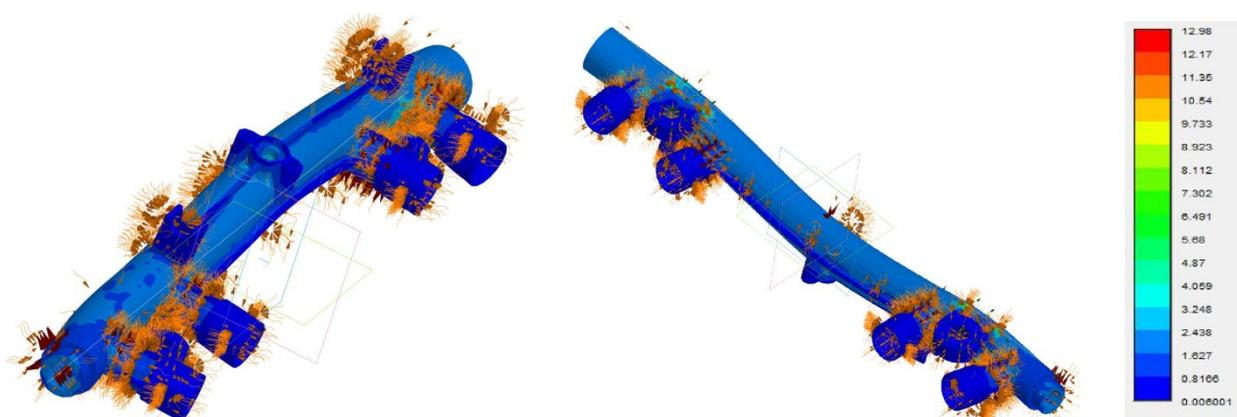


Рисунок 11 – Эпюра напряжений

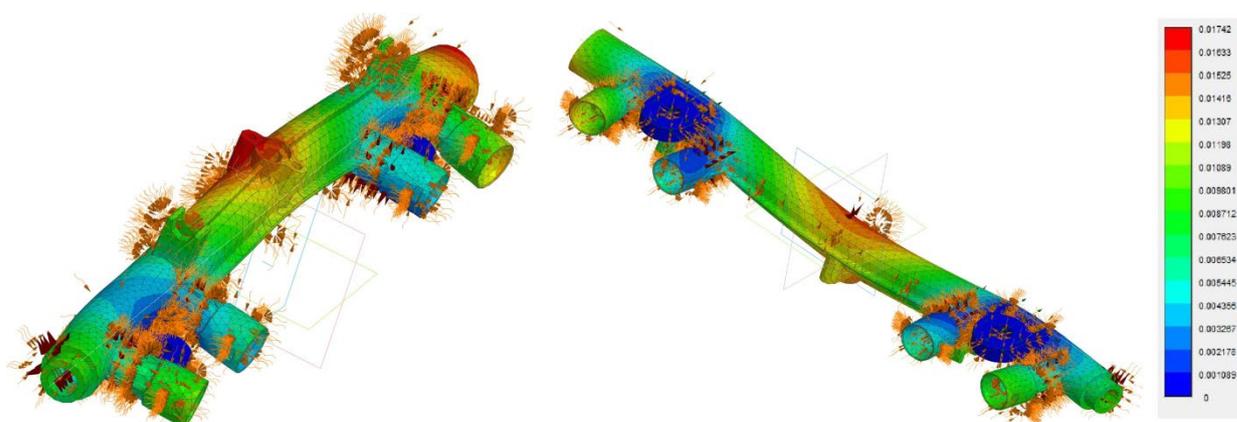


Рисунок 12 – Эпюра перемещений

Таблица 26 – Результаты анализа корпуса топливной рампы

Параметр	Значение
Масса корпуса, гр	<110
Внутренний объём корпуса, см ³	>56
Максимальное эквивалентное напряжение, МПа	13
Суммарное линейное перемещение, мм	0,017423

5 Моделирование работы двигателя с новой рампой в программе Ricardo Wave

Исследование работы двигателя, при работе на бензине и при работе на биогазе (биометан) при впрыске на клапан двигателя и при подаче непосредственно в форкамеру, осуществлялось в среде программного обеспечения Ricardo Wave версии 19.1. Визуальное представление архитектуры модели демонстрируется на рисунке 13.

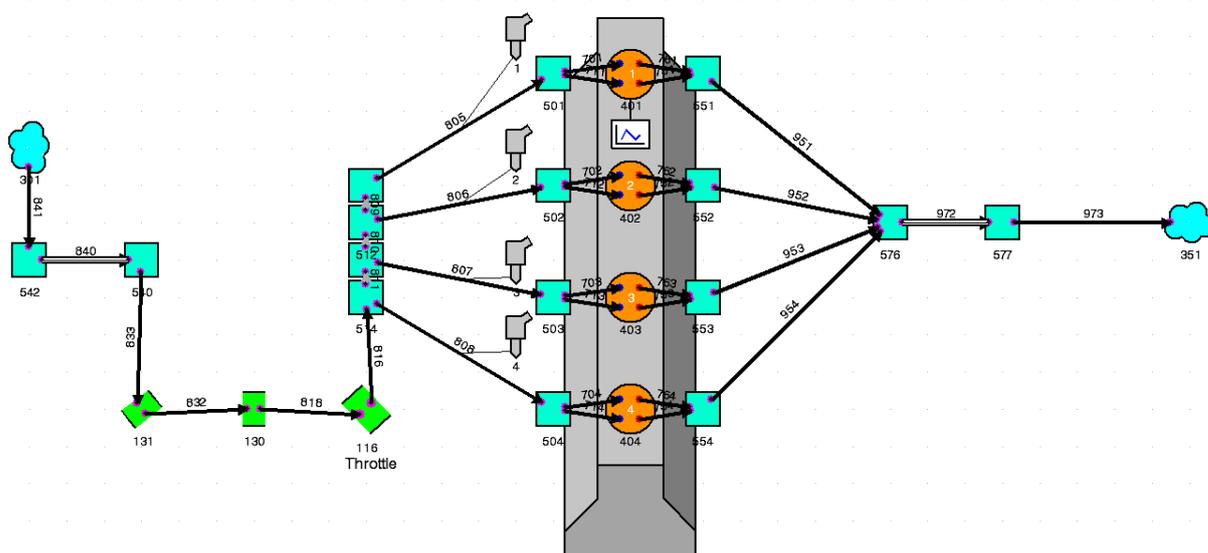


Рисунок 13 – Модель атмосферного двигателя на жидких топливах и газообразном топливе

Проведем моделирование основных характеристик работы при работе на бензине и впрыске на клапан.

Результаты моделирования четырехцилиндрового атмосферного двигателя на жидком топливе при работе на бензине в форме таблицы из программы WAVE Ricardo 19.1 представлены в таблице 27. На рисунках ниже будут приведены скоростные характеристики по основным параметрам работы двигателя.

Таблица 27 – Результаты моделирования при работе на этаноле

Engine speed	rpm	6499	5999	5500	5000	4500	3999	3500	2999	2500	1999	1500	999
Stoichiometric A/F	-	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463	8.9463
Trapped A/F	-	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Mass Airflow	kg/hr	315.154	317.552	306.518	282.859	252.248	226.894	191.43	161.65	132.188	104.544	76.0798	49.1151
Pseudo-volumetric efficiency	kg/hr/rpm	0.0484853	0.0529255	0.0557306	0.0565718	0.0560551	0.0567234	0.0546944	0.0538833	0.0528749	0.0522722	0.0507196	0.0491165
BMEP	bar	7.20337	8.20469	8.97755	9.41614	9.54595	9.80942	9.56067	9.48393	9.29685	9.13503	8.68983	8.11725
Brake Power	kW	62.5548	65.7695	65.9679	62.9006	57.3909	52.4222	44.7063	38.0121	31.0519	24.409	17.4147	10.8445
BSFC	kg/kW/hr	0.387542	0.371405	0.357421	0.345917	0.338097	0.332938	0.329382	0.327123	0.32746	0.329462	0.336055	0.348388
Brake specific unburned fuel emissions	g/kW/hr	0.183871	0.17776	0.171584	0.166303	0.162112	0.159111	0.156874	0.157413	0.154791	0.157624	0.169762	0.302785
Charging efficiency	-	0.999161	1.0921	1.14317	1.15159	1.13395	1.14277	1.0924	1.07022	1.0518	1.03901	1.01299	0.991949
Delivered efficiency	-	0.999135	1.09208	1.14314	1.15157	1.13392	1.14274	1.09237	1.0702	1.05177	1.03899	1.013	0.992315
Combined Displacement	m ³	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322	0.00160322
Brake thermal engine efficiency	%	34.6228	36.1272	37.5406	38.7891	39.6863	40.3012	40.7364	41.0177	40.9754	40.7264	39.9275	38.514
EGR	-	1.93627e-09	-5.80637e-09	-6.49456e-08	1.00617e-09	5.29583e-09	-4.50973e-09	-4.21312e-08	-2.24373e-08	2.71783e-08	-6.81628e-08	-6.37985e-09	-4.37472e-08
FMEP	bar	1.40866	1.31138	1.21633	1.12379	1.03437	0.951509	0.869957	0.794353	0.723294	0.65714	0.596312	0.540406
Friction Energy Loss	%	6.77069	5.77433	5.08623	4.62936	4.30029	3.90919	3.70673	3.43555	3.18789	2.9297	2.7399	2.56407
Friction torque	N*m	17.9718	16.7307	15.5181	14.3374	13.1966	12.1394	11.099	10.1344	9.22784	8.38383	7.60779	6.89453
Fuel mass flow	kg/hr	24.2426	24.4271	23.5783	21.7584	19.4037	17.4534	14.7254	12.4346	10.1683	8.04186	5.8523	3.77809
Fuel volume flow	L/hr	30.7113	30.9451	29.8698	27.5643	24.5812	22.1105	18.6547	15.7526	12.8815	10.1877	7.41389	4.7862
GMEP	bar	9.80751	10.7134	11.2775	11.44	11.2936	11.3734	10.8975	10.6484	10.2779	9.96738	9.39538	8.73549
Engine out unburned fuel flow	g/s	0.003195	0.00324756	0.00314418	0.00290571	0.00258438	0.00231692	0.00194812	0.00166211	0.00133515	0.00106874	0.00082121	0.000912097
Heat Transfer Rate	W	24976.8	24979.8	24046.3	22333	20304.7	18909.8	16715.8	14885.4	13027.9	11212.3	9333.21	7453.59
Heat Transfer Loss	%	13.8242	13.7214	13.6841	13.7722	14.0409	14.5375	15.2315	16.0624	17.1914	18.7077	21.3986	26.4713
Indicated Power	hp	100.292	102.295	100.45	94.4181	85.3019	77.1183	65.4073	55.2445	44.881	35.0877	24.9561	15.5108
IMEP	bar	8.61203	9.51608	10.1939	10.5399	10.5803	10.7609	10.4306	10.2783	10.0201	9.79217	9.28614	8.65766
ISAC	kg/kW/hr	4.21398	4.16289	4.09206	4.01745	3.96556	3.94549	3.92483	3.92393	3.9497	3.99558	4.08817	4.24635

Продолжение таблицы 27

ISFC	kg/kW/hr	0.324152	0.320223	0.314774	0.309035	0.305043	0.303499	0.30191	0.301841	0.303823	0.307353	0.314475	0.326642
Indicated Torque	N*m	109.873	121.407	130.054	134.469	134.984	137.289	133.075	131.131	127.838	124.929	118.473	110.455
Lambda	-	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311	1.45311
Lower Heating Value	J/kg	2.683e+07	2.683e+07										
Exhaust port pressure	bar	1.41907	1.42473	1.40931	1.37184	1.32841	1.2907	1.2403	1.19947	1.15932	1.1236	1.08794	1.05621
Trapped equivalence ratio	-	0.688178	0.688178	0.688178	0.688178	0.688177	0.688178	0.688178	0.688178	0.688178	0.688177	0.688177	0.688177
Intake port pressure	bar	0.931371	0.923774	0.92786	0.93881	0.951839	0.961871	0.971627	0.978902	0.983857	0.990612	0.994143	0.995075
PMEP	bar	-1.19548	-1.19734	-1.0836	-0.900076	-0.713306	-0.612497	-0.466828	-0.370113	-0.257734	-0.175213	-0.109239	-0.0778356
PMEP from crossing point	bar	-0.934518	-0.932478	-0.850058	-0.699055	-0.546631	-0.478254	-0.364783	-0.283062	-0.210574	-0.143202	-0.0938393	-0.0673849
HC	ppm	41.6952	42.0612	42.1871	42.2494	42.1374	41.9978	41.8544	42.2885	41.5415	42.0445	44.3946	76.3791
Pumping torque	N*m	-15.252	-15.2757	-13.8247	-11.4832	-9.10041	-7.81427	-5.95582	-4.72193	-3.28819	-2.23537	-1.39368	-0.993032
Plenum volumetric efficiency	-	0.946999	1.03568	1.0842	1.09093	1.07088	1.07696	1.02973	1.00978	0.988435	0.972872	0.943155	0.917964
Plenum volumetric efficiency (air-only)	-	0.925638	1.01232	1.05974	1.06632	1.04673	1.05267	1.00651	0.987006	0.96614	0.950928	0.92188	0.897258
Residual gas fraction	%	5.11367	4.28068	3.99422	3.85235	4.10725	4.42499	4.75141	4.40151	5.46311	5.27057	6.29056	7.1785
Scavenging efficiency	-	0.948863	0.957193	0.960058	0.961476	0.958928	0.95575	0.952486	0.955985	0.945369	0.947294	0.937094	0.928215
Scavenging ratio	-	0.948839	0.957172	0.960038	0.961458	0.958908	0.955729	0.952462	0.955967	0.945343	0.947275	0.937099	0.928558
Ambient reference temperature	K	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
Exhaust gas temperature	K	1048.41	1044.1	1032.79	1019.57	1005.56	994.596	982.736	971.028	958.425	946.137	920.762	882.35
Intake port gas temperature	K	297.431	295.396	294.943	296.153	298.388	300.298	300.729	301.3	303.285	305.136	307.702	311.549
Brake Torque	N*m	91.9011	104.676	114.536	120.132	121.788	125.149	121.976	120.997	118.61	116.545	110.865	103.56
Trapping ratio	-	1.00003	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00003	1.00002	1.00003	1.00002	0.999995	0.999631
Trapped air volumetric efficiency	-	0.865773	0.945055	0.995142	1.01016	1.00094	1.01287	0.976644	0.962155	0.944156	0.933389	0.905642	0.876698
Total volumetric efficiency	-	0.86575	0.945034	0.995121	1.01014	1.00092	1.01285	0.97662	0.962136	0.94413	0.93337	0.905646	0.877022

На рисунке 14 представлены эффективные параметры двигателя.

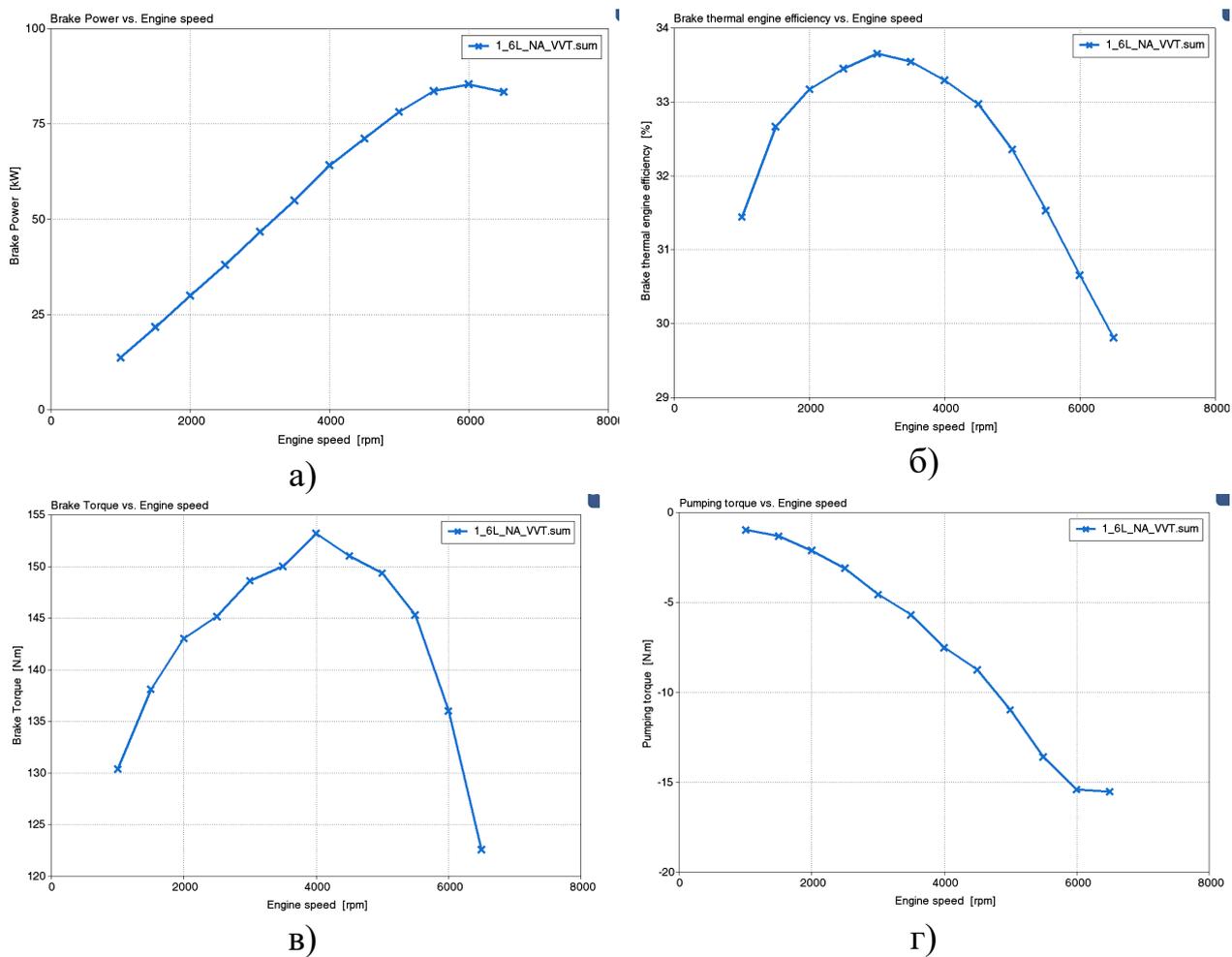
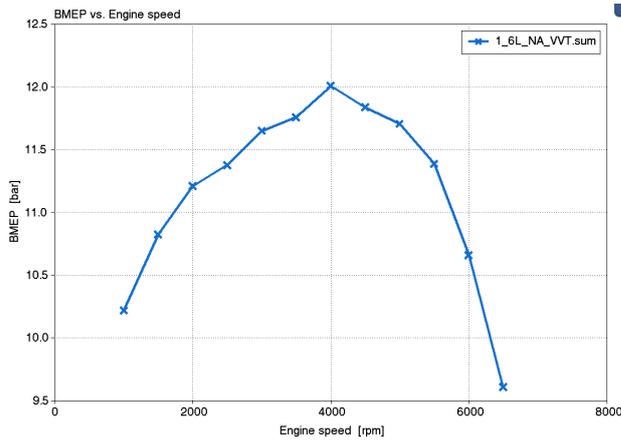
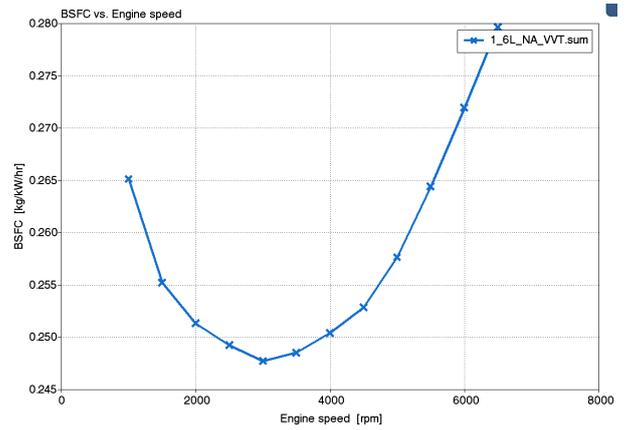


Рисунок 14 – Основные эффективные параметры двигателя: а) эффективная мощность; б) эффективный КПД; в) крутящий момент; г) насосные потери крутящего момента

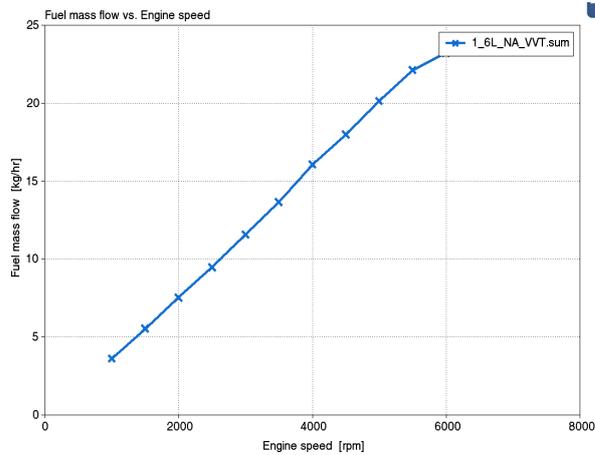
На рисунке 15 представлены осредненные эффективны параметры, характеризующие рабочий процесс двигателя.



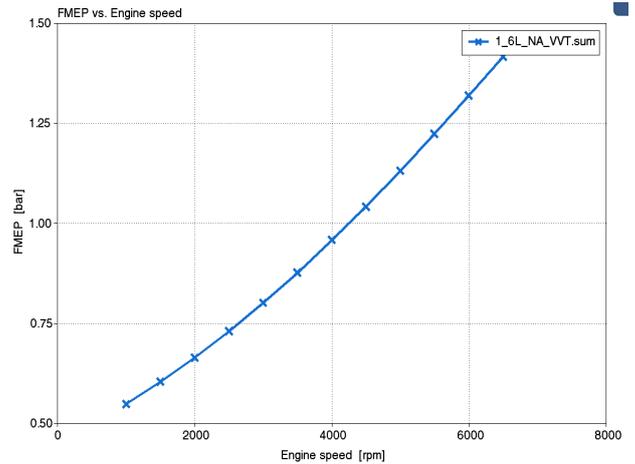
а)



б)



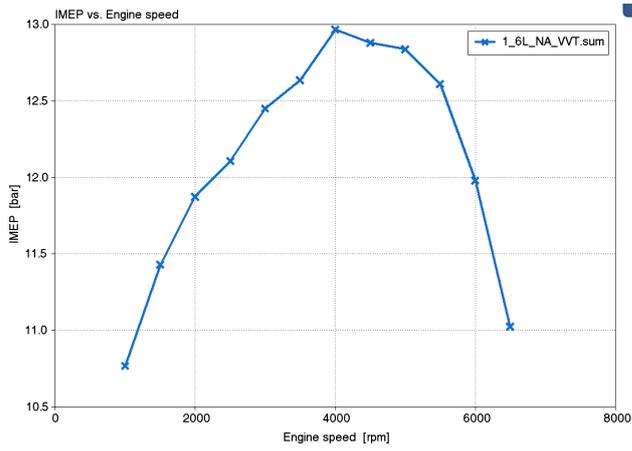
в)



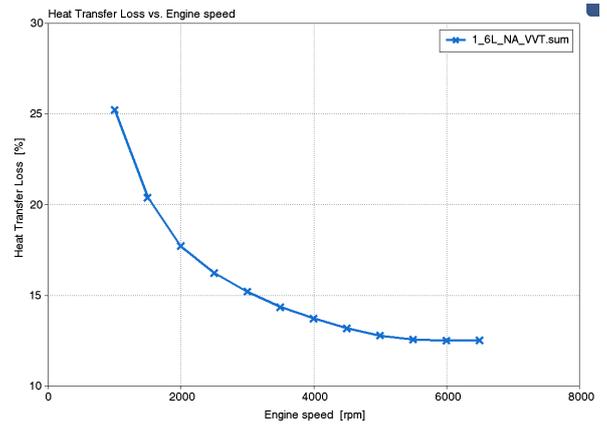
г)

Рисунок 15 – Основные эффективные параметры двигателя: а) среднее эффективное давление в цилиндре; б) удельный эффективный расход топлива; в) часовой расход топлива; г) средние потери давления на трение

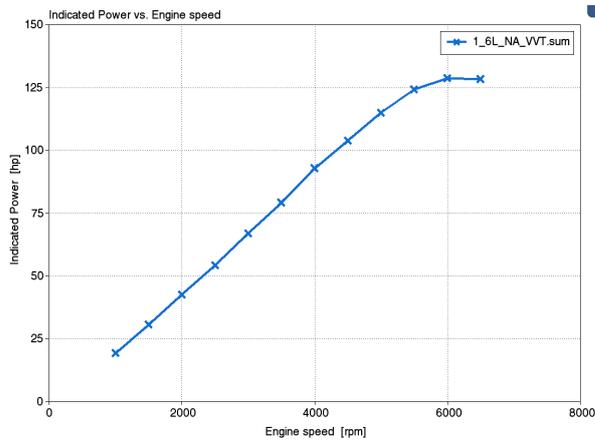
На рисунке 16 представлены индикаторные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



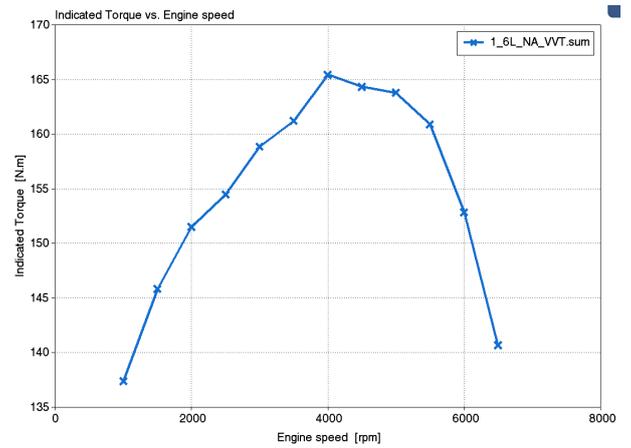
а)



б)



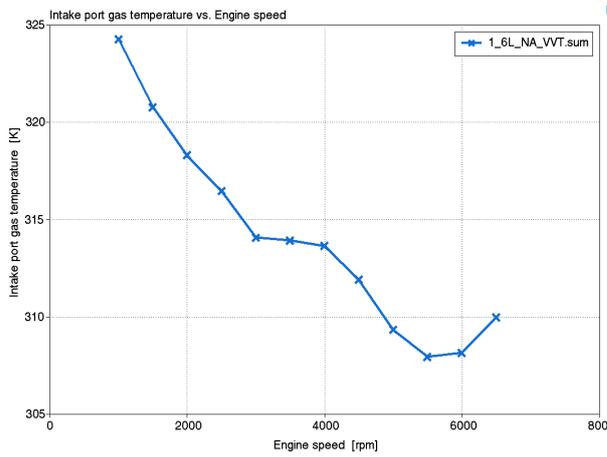
в)



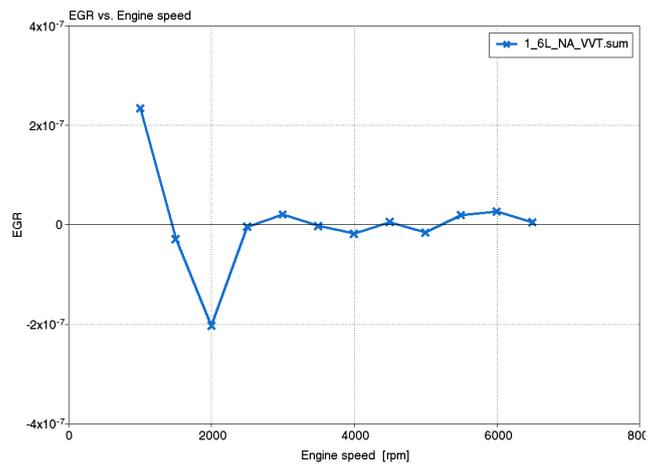
г)

Рисунок 16 – Основные индикаторные параметры двигателя: а) среднее индикаторное давление; б) доля потерь тепла в стенку в %; в) индикаторная мощность; г) индикаторный крутящий момент

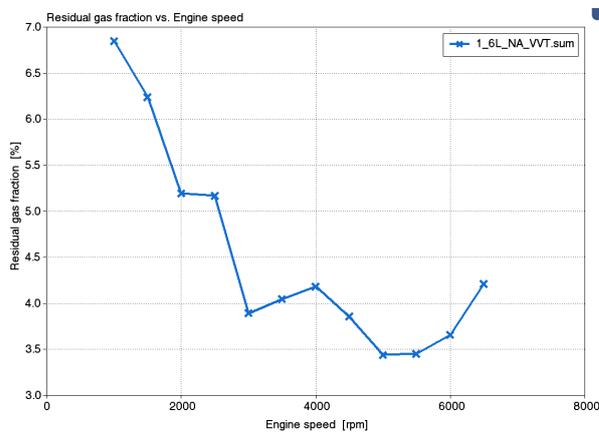
На рисунке 17 представлены основные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



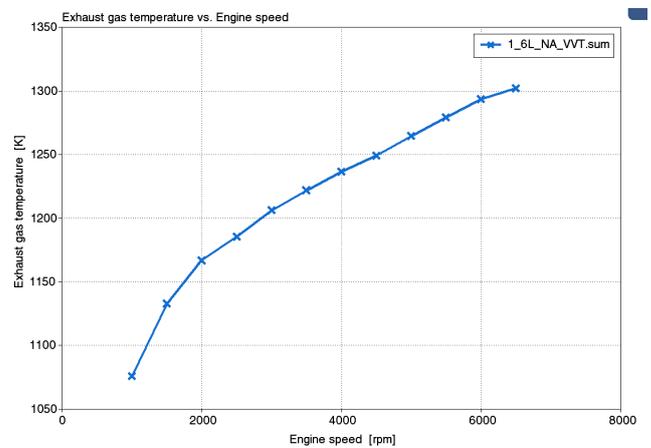
а)



б)



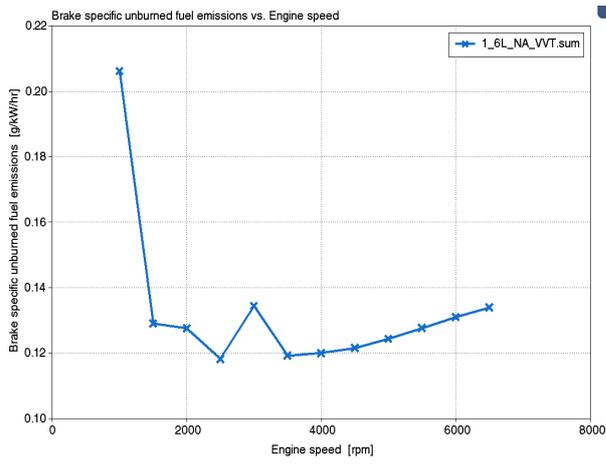
в)



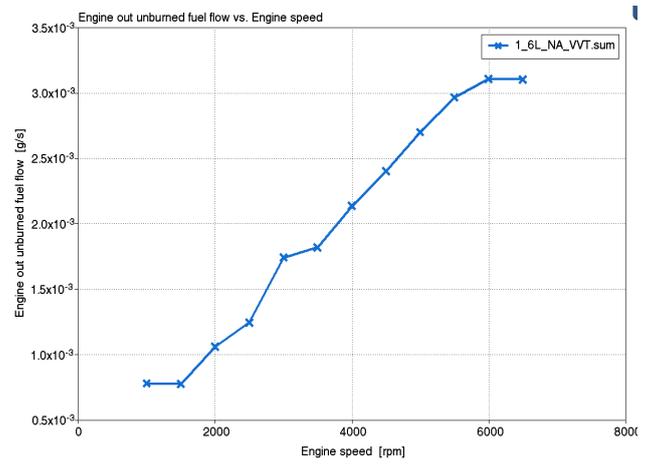
г)

Рисунок 17 – Основные параметры двигателя: а) температура воздуха на впуске; б) коэффициент перепуска отработавших газов; в) коэффициент остаточных газов; г) температура остаточных газов

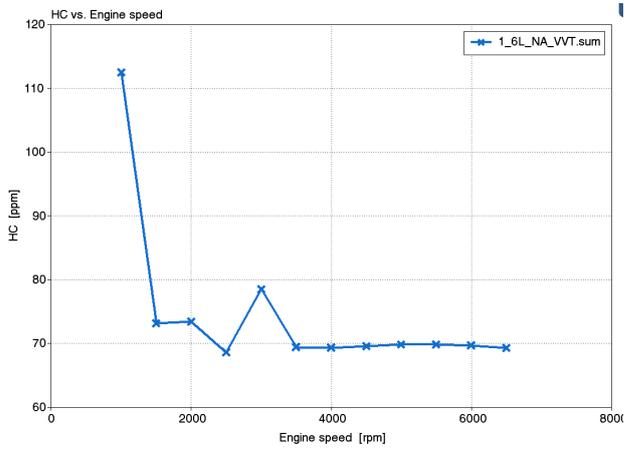
На рисунке 18 представлены основные параметры токсичности по несгоревшим углеводородам, характеризующие рабочий процесс двигателя и полноту сгорания топлива.



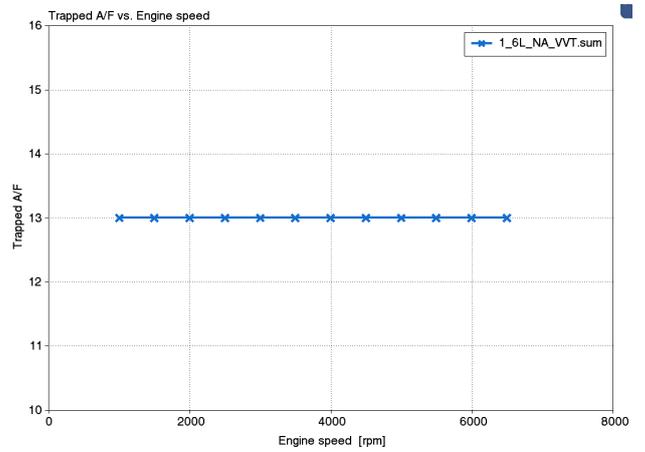
а)



б)



в)



г)

Рисунок 18 – Токсичность по несгоревшим углеводородам: а) в грамм на кВт час; б) в грамм на секунду; в) в ppm (частиц на миллион); г) массовое отношение воздуха к топливу

Заключение

На основании результатов данной бакалаврской работы, можно сделать следующие выводы:

- Был произведён анализ существующих топливных систем двигателей производства АО «АвтоВАЗ». Были рассмотрены их конструктивные особенности, преимущества и недостатки, что позволило выявить направление для дальнейшего совершенствования топливной системы;
- Выполнены тепловой расчёт двигателя, в ходе которых определены основные параметры, влияющие на эффективность работы топливной системы. Полученные данные использованы при проектировании модернизированной топливной рампы;
- Разработана конструкция модернизированной топливной рампы, обеспечивающая более равномерное распределение топлива между цилиндрами двигателя. Был проведён прочностной расчёт модернизированной топливной рампы, который подтвердил её надёжность и работоспособность;

Список используемых источников

1. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
2. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
3. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1983.
4. Смоленский, В.В. Автомобильные двигатели: курс лекций / В.В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 183 с.
5. Muhammad Imran Khan, Tabassum Yasmin, and Abdul Shakoor. Technical overview of compressed natural gas (cng) as a transportation fuel. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51:785 – 797, 2015.
6. Sonia Yeh. An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. Energy Policy, 35(11):5865 – 5875, 2007.
7. Uwe Thien, Alexander Schaerfl, Markus Rudolf, Friedrich Quissek, Helmut Eichlseder, and Axel Bernt. Engine and new fuel management system for cng powered vehicles. 01 2007.
8. PM Darade and RS Dalu. Investigation of performance and emissions of cng fuelled vcr engine. Int J Emerg Technol Adv Eng, 3(1):77–83, 2013.
9. R Ebrahimi and M Mercier. Experimental study of performance of spark igni- tion engine with gasoline and natural gas. International Journal of Engineering, 24(2010):65–74, 2010.
10. Rosli Abu Bakar Semin. A technical review of compressed natural gas as an alter- native fuel for internal combustion engines. Am. J. Eng. Appl. Sci, 1(4):302–311, 2008.

11. Amir Hossein Shamekh, Nima Khatibzadeh, and Abazar Shamekhi. A comprehensive comparative investigation of compressed natural gas as an alternative fuel in a bi-fuel spark ignition engine. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 27(1):73–83, 2008.
12. CK Samantaray, BB; Mohanta. Analysis of industrial flame characteristics and constancy study using image processing technique. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, 9(1):1604–1613, 2015.
13. Kasianantham Nanthagopal, Rayapati Subbarao, Thangavelu Elango, Ponnusamy Baskar, and Kandasamy Annamalai. Hydrogen enriched compressed natural gas- a futuristic fuel for internal combustion engines. *Thermal Science*, 15(4):1145–1154, 2011.
14. Mirko Baratta and Daniela Misul. Development of a method for the estimation of the behavior of a cng engine over the nedc cycle and its application to quantify for the effect of hydrogen addition to methane operations. *Fuel*, 140:237–249, 2015.
15. MA Kalam, SN Kazi, and MH Jayed. Power boosting of a modified natural gas engine. *International Journal of Physical Sciences*, 6(28):6548–6557, 2011.
16. Saad Aljamali, Wan Mohd Faizal Wan Mahmood, Shahrir Abdullah, and Yusoff Ali. Comparison of performance and emission of a gasoline engine fuelled by gasoline and cng under various throttle positions. *Journal of Applied Sciences*, 14(4):386, 2014.
17. Nils-Olof Nylund and Alex Lawson. Exhaust emissions from natural gas vehicles. *IANGV Emission Report*, pages 31–40, 2000.
18. M Mansha, AR Saleemi, SH Javed, and Badar M Ghauri. Prediction and measurement of pollutant emissions in cng fired internal combustion engine. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 19(5):539–547, 2010.
19. Muhammad Imran Khan, Tabassum Yasmin, and Abdul Shakoor. International experience with compressed natural gas (cng) as environmental friendly fuel. *Energy Systems*, 6(4):507–531, 2015.

20. Xiaoyan Huang, Yang Wang, Zhenyu Xing, and Ke Du. Emission factors of air pollutants from cng-gasoline bi-fuel vehicles: Part ii. co, hc and no x. *Science of The Total Environment*, 565:698–705, 2016.
21. Patrik Einewall, Per Tunestål, and Bengt Johansson. Lean burn natural gas operation vs. stoichiometric operation with egr and a three way catalyst. *SAE Special Publications*, 2005(SP-1972):343–362, 2005.
22. Fan Zeng and Keith L Hohn. Modeling of three-way catalytic converter performance with exhaust mixture from natural gas-fueled engines. *Applied Catalysis B: Environmental*, 182:570–579, 2016.
23. Richard Tilagone and Stephane Venturi. Development of natural gas demonstrator based on an urban vehicle with a down-sized turbocharged engine. *Oil & gas science and technology*, 59(6):581–591, 2004.
24. Lei Zhu, Zhuoyao He, Zhen Xu, Xingcai Lu, Junhua Fang, Wugao Zhang, and Zhen Huang. In-cylinder thermochemical fuel reforming (tfr) in a spark-ignition natural gas engine. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2016.
25. MA Kalam and HH Masjuki. An experimental investigation of high performance natural gas engine with direct injection. *Energy*, 36(5):3563–3571, 2011.
26. Sukrut S Thipse, Shailesh B Sonawane, Ashwin FD'Souza, SD Rairikar, Kishor Kumar Kavathekar, and Neelkanth V Marathe. Injection strategies, optimization and simulation techniques on di cng technology. Technical report, *SAE Technical Paper*, 2015.
27. Mingi Choi, Sanghoon Lee, and Sungwook Park. Numerical and experimental study of gaseous fuel injection for cng direct injection. *Fuel*, 140:693–700, 2015.
28. Mingi Choi, Jingeun Song, and Sungwook Park. Modeling of the fuel injection and combustion process in a cng direct injection engine. *Fuel*, 179:168–178, 2016.
29. Mirko Baratta, Andrea E Catania, Ezio Spessa, Lothar Herrmann, and Klaus Roessler. Multi-dimensional modeling of direct natural-gas injection and

- mixture formation in a stratified-charge si engine with centrally mounted injector. *SAE International Journal of Engines*, 1(2008-01-0975):607–626, 2008.
30. Jianjun Zheng, Zuohua Huang, Jinhua Wang, Bin Wang, Dezhong Ning, and Yingjia Zhang. Effect of compression ratio on cycle-by-cycle variations in a natural gas direct injection engine. *Energy & Fuels*, 23(11):5357–5366, 2009.
31. Shaobo Ji, Xin Lan, Yong Cheng, Xiuliang Zhao, Xinhai Li, and Fengjuan Wang. Cyclic variation of large-bore multi point injection engine fuelled by natural gas with different types of injection systems. *Applied Thermal Engineering*, 102:1241–1249, 2016.
32. How Heoy Geok, Taib Iskandar Mohamad, Shahrir Abdullah, Yusoff Ali, Azhari Shamsudeen, and Elvis Adril. Experimental investigation of performance and emission of a sequential port injection natural gas engine. *European Journal of Scientific Research*, 30(2):204–214, 2009.
33. M Patel Nimit and AD Patel. Conversion of diesel engine to port injection cng engine using gaseous injector nozzle multi holes geometries improvement: A review. *International Journal of Automotive Engineering*, 6(3):2220–2235, 2016.
34. VS Midhun, S Karthikeyan, S Krishnan, SD Rairikar, KP Kavathekar, SS Thipse, NV Marathe, et al. Development of cng injection engine to meet future euro-v emission norms for lcv applications. Technical report, SAE Technical Paper, 2011.
35. Paolo Lino, Bruno Maione, and Claudio Amorese. Modelling and predictive control of a new injection system for compressed natural gas engines. *Control Engineering Practice*, 16(10):1216–1230, 2008.
36. Lindfeldt, E.G., et al., (2010), "Strategies for a road transport system based on renewable resources – The case of an import-independent Sweden in 2025", *Appl. Energy*, Vol.87 (6), pp. 1836-1845.

- 37.Y. Saboohi, H. Farzaneh, Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 10, October 2009, Pages 1925-1932, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.017.)
- 38.Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Kenneth Karlsson, 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth, *Applied Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online 31 March 2010, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.03.001.
- 39.Smit, R., et al., (2010), "Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis", *Atmos. Environ*, Vol.44 (25), pp. 2943-2953.
- 40.Sharad, G. (2012), "Impacts of traffic-flows on vehicular-exhaust emissions at traffic junctions", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.17 (1), pp. 21-27.
- 41.Rabl, A.and de Nazelle, A., (2012), "Benefits of shift from car to active transport", *Transp.Policy*, Vol.19 (1), pp. 121-131.
- 42.Su, J., et al., (2011), "Non-methane volatile organic compound emission inventories in Beijing during Olympic Games 2008", *Atmos. Environ.*, Vol.45 (39), pp. 7046-7052.
- 43.Wang, H., et al., (2010), "Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005", *Environmental Pollution*, Vol.158 (2), pp. 394-400.
- 44.Haydar, F. and Padiaditi, K. 2010. Evaluation of the environmental impact assessment system in Syria. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(6), pp.363-370.
- 45.Ou, X., Yan, X., Zhang, X. and Liu, Z. 2012. Life-cycle analysis on energy consumption and GHG emission intensities of alternative vehicle fuels in China. *Applied Energy*, 90(1), pp.218-224.
- 46.Heywood, John B., *Internal combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill International Editions -1988

47. McGahan, Paul., PM, Estimation of On-Road Vehicle Fuel Consumption and Emissions using Analysis of OBD Signals, 4th Year Mechanical Engineering Project, BEng, 07/04/2006.
48. Directive 98/69/EC of The European Parliament and of the council of 13 October 1998, Relating to measures to be taken against pollution by emission from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC
49. Barone, Stefano. Statistics-Driven Development of OBD Systems; An Overview, Quality and Reliability Engineering International, 2006, vol 22, 615-628
50. Sturm et al. Determination of Traffic emissions – intercomparison of different calculation methods, the science of the total environment, 189/190 (1996) 187-196
51. Council directive of 20 March 1970 on the approximation of the laws of the Member States on measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles (2004), European Union.
52. Ludykar et al., Cold start emissions at + 22, -7 and -20 C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, the Science of the Total Environment 235 (1999) 65-69
53. Abdel- Rahman, A.A., On the emissions from internal combustion engines: A review. International Journal of Energy Research volume 22 (1998), 483-513
54. Pierson et al. C, Comparison of the SCAQS tunnel study with other on-road emissions data. Journal of Air Waste Management Association 40, 1495-1504
55. Wang, Q., H. Huo, K. He, Z. Yao and Q. Zhang, “Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities”, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 13, 289-297, 2008.

56. Hao Cai, Shaodong Xie, "Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005", *Atmospheric Environment*, Volume 41, Issue 39, December 2007, Pages 8963-8979
57. Ludykar et al., Cold start emissions at + 22, -7 and -20 C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, *the Science of the Total Environment* 235 (1999) 65-69
- 58.. Saerens, J. Vandersteen, T. Persoons, J. Swevers, M. Diehl, E. Van den Bulck, Minimization of the fuel consumption of a gasoline engine using dynamic optimization, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 9, September 2009, Pages 1582- 1588, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.022.
59. Wenzel, T. 2003; Use of Remote Sensing measurements to evaluate vehicle emission monitoring programs: results from Phoenix, Arizona. *Environmental Science and Policy* Volume 6, Issue 2: pp 153-166.
60. Wielenmann et al., Regulated and unregulated diesel and cold start emissions at different temperatures, *Atmospheric Environment*, vol 39 (2005), 2433-2441)
61. Myung et al. Experimental investigation of the effect of thin- wall substrates and spark timing on total hydrocarbon emissions during cold-start for super-ultra low-emission application, *Journal of Automobile Engineering*, Vol 218, Part D (2004)