

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)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»
(код и наименование направления подготовки)

Водородная энергетика и декарбонизация в энергетических системах
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Применение альтернативных топлив в современных энергетических
установках

Обучающийся

В.И. Анищенко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский

(ученая степень, ученое звание, Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1 Анализ публикаций о внедрении нестандартных видов топлива в системах генерации энергии	6
1.1 Анализ заменителей традиционного топлива для автотранспорта	8
1.2 Анализ перспектив использования альтернативных видов топлива	35
Глава 2 Моделирование двигателя	43
2.1 Модель двигателя для исследования.....	43
2.2 Испытуемый объект и параметры условий испытаний...	49
Глава 3 Результаты исследований процесса сгорания альтернативного топлива природного газа с водородом в условиях газодизельного цикла.....	51
Глава 4 Обзор результатов моделирования влияния альтернативных топлив на характеристики ДВС	57
4.1 Анализ результатов моделирования при работе на бензине	57
4.2 Анализ результатов моделирования при работе на метаноле	61
4.3 Анализ результатов моделирования при работе на этаноле	66
4.4 Анализ результатов моделирования при работе на Е85...	71
Заключение.....	77
Список используемых источников.....	78
Приложение А.....	86
Приложение Б.....	88
Приложение В.....	90
Приложение Г.....	92

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы и научная значимость настоящего исследования.

Веками бензин и дизель служили основой для двигателей транспортных средств. Однако уменьшение объемов добычи нефти и волатильность цен на неё побуждают к поиску альтернатив автомобильному топливу. Варианты альтернативной энергии могут способствовать сокращению энергопотребления, уменьшая тем самым выбросы CO₂, снижая экологическое загрязнение и повышая энергетическую независимость.

Относительно классических энергоносителей, таких как уголь и нефть, нетрадиционные источники энергии выделяются своим минимальным влиянием на экологию, повышенной экономической эффективностью и более высоким уровнем энергетической производительности. Некоторые из этих альтернатив уже находят применение на практике, обнаруживая свои перспективы как средства энергоснабжения будущего.

Биотопливо отличается повышенной экологичностью по сравнению с традиционным бензином и может обеспечить большую устойчивость к изменениям климата и экономическую выгоду в ближайшем будущем. Электроэнергия, представляющая собой альтернативный источник энергии, также выделяется своими превосходными экологическими характеристиками и сниженными операционными затратами, что делает её перспективным вариантом топлива в среднесрочной перспективе.

Ожидается, что в ближайшем будущем водород станет альтернативой конверсионным видам топлива ввиду возвышенной потребности в инвестициях и текущем экологически неблагоприятном производстве последних. Использование сжатого воздуха как альтернативного источника энергии оказалось малоэффективным и несостоятельным для обеспечения рентабельного радиуса действия по сравнению с традиционными энергоносителями.

Следовательно, анализ потенциала использования нетрадиционных видов топлива в текущих энергосистемах представляет собой значимый объект изучения для магистерской работы.

Объект исследования.

Автомобильные энергетические установки

Предмет исследования.

альтернативные топлива в ДВС

Целью работы

заключается в анализе возможностей использования альтернативных источников энергии в современных энергосистемах.

Гипотеза исследования

Использование альтернативных видов топлива в передовых энергосистемах способствует очищению и повышению эффективности горения в двигателях внутреннего сгорания.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. провести анализ недостатков существующих источников энергии и подготовить данные для изучения возможностей использования альтернативных видов топлива в текущих энергетических системах;
2. определить потенциал использования неисчерпаемых энергоносителей в текущих энергетических системах.

Методы исследования.

Аналитический метод исследования, метод моделирования процессов работы, экспериментальный метод исследования.

Научная новизна исследования

заключается в идее обеспечить чистое и эффективное сгорание в ДВС за счет применения альтернативных топлив в современных энергетических установках.

Личное участие автора

состоит в том, что автор принимал непосредственное участие в формировании аналитического обзора по направлению исследований, а также в разработке модели для исследования и анализе результатов моделирования данных и полученных на основании их анализа практических рекомендаций и выводов.

Апробация и внедрение результатов работы

велись в течении всего исследования. Его результаты докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» в 2022, 2023 и 2024 г.
- международная научно-практическая конференция «Перспективы развития науки и образования», Россия, г. Тамбов, 31 мая 2023 г.
- опубликована одна научная статья: Анищенко В.И. Применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС / Смоленская Н.М., Масленникова А.В., Смольяков А.Н., Неклюдов Д.А., Анищенко В.И. // Научный альманах 2023·N 5-2(103). С.53-58

На защиту выносятся:

1. анализ перспективы применения альтернативных топлив в современных энергетических установках;
2. возможности снижения токсичности за счет применения альтернативных топлив в современных энергетических установках.

Структура магистерской диссертации.

Диссертации состоит из введения, 4 глав, заключения с основными результатами и выводами, содержит 46 рисунка, 4 таблицы, списка использованных источников (81 источник). Основной текст изложен на 85 страницах.

Глава 1 Анализ публикаций о внедрении нестандартных видов топлива в системах генерации энергии

С начала эпохи урбанизации наблюдается непрерывный рост потребления энергетических ресурсов. Этот спрос продолжает расширяться по всему земному шару вследствие увеличения численности населения и ускоренного прогресса в области транспортных средств. Отрасль транспорта стоит на первом месте по использованию нефти на мировом уровне, причём около 60% всей добытой нефти расходуется именно на его нужды. Эта же отрасль занимает второе место по объёму выпускаемых в атмосферу парниковых газов, в том числе около 20% всех выбросов CO₂ связаны с транспортной деятельностью [1]. Сегодня большинство транспортных средств функционируют на основе бензина, однако запасы ископаемого топлива ограничены и распределены между странами неравномерно, а их сжигание значительно ухудшает экологическую обстановку. С учетом нарастающей обеспокоенности по поводу энергетической безопасности, изменений климата и возрастающего мирового спроса на энергию, общественное внимание все чаще обращается к этим проблемам. В рамках стремления к сокращению зависимости от нефти и переходу к устойчивым видам транспорта, ряд стран задумывается о замене традиционных источников топлива на альтернативные [2]. График на рисунке 1 иллюстрирует траекторию изменения уровня энергопотребления с 1860 по 2010 год.

Глобальная энергетическая система во многих странах преимущественно опирается на использование ископаемых источников топлива. В качестве примера, автомобильные и другие транспортные перевозки в Европе на 96% зависят от нефти и её производных [3]. В 2010 году Европейский союз был вынужден импортировать нефть на общую сумму 210 миллиардов евро. Однако, в обозримом будущем, нефть столкнется с проблемой сокращения запасов, а также нестабильностью и

неопределенностью поставок [4]. Это обусловлено тем, что месторождения нефти расположены в ограниченном количестве географических регионов. Прогнозы указывают, что к 2030 году Организация стран-экспортеров нефти (ОПЕК) будет контролировать до 70% мировых поставок жидкого топлива и 45% всего нефтяного рынка [5]. Следовательно, уменьшение запасов нефти или изменения в политике ее экспорта могут значительно затронуть вопросы энергетической безопасности стран. Пережив энергетический кризис, заметно сокращение различий в энергетических стратегиях по всему миру. В ответ, многие государства активно стремятся к энергетической независимости и внедрению в практику альтернативных источников энергии.

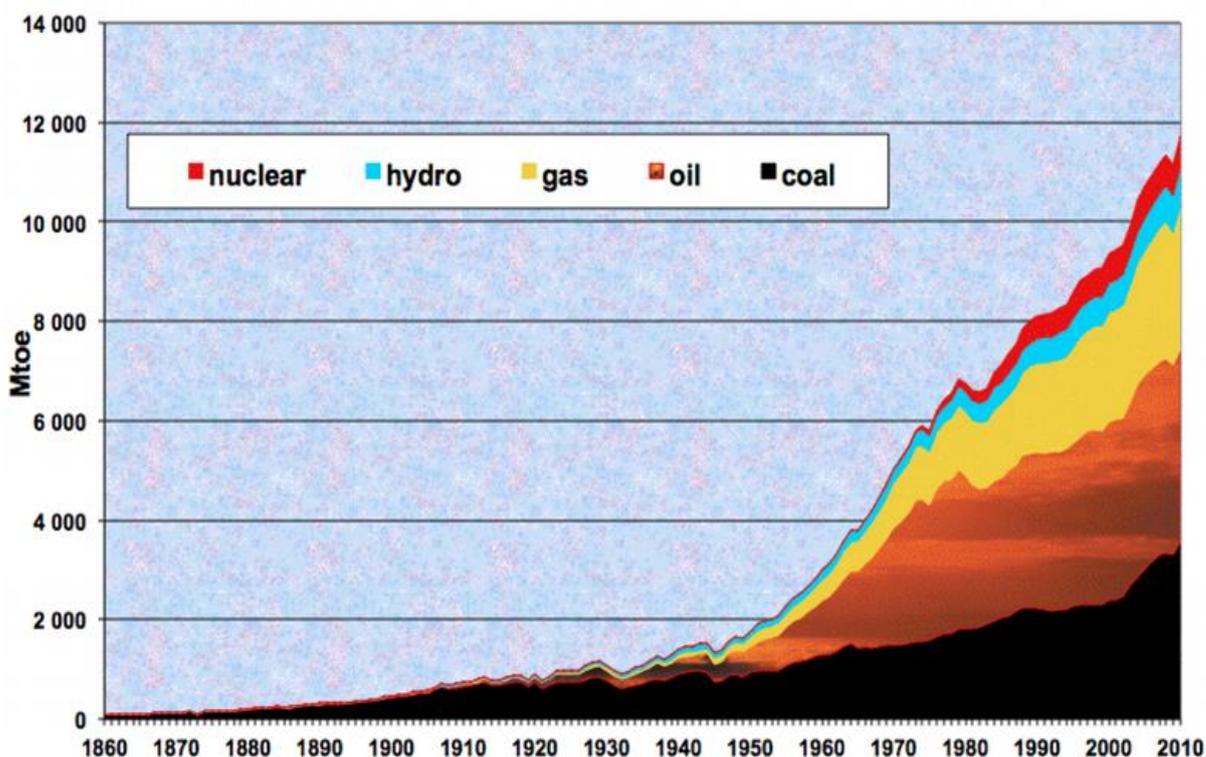


Рисунок 1 – Развитие мирового энергопотребления [3] *Mtoe: миллионы тонн нефтяного эквивалента

Автомобильные двигатели на базе внутреннего сгорания выделяют значительный объем загрязнителей, включая углеводороды, оксиды азота, монооксид углерода и диоксид углерода, способствуя развитию онкологических заболеваний, кислотных осадков, сердечно-сосудистых проблем и ускорению климатических изменений. В 2009 году сектор

транспорта ответственен за 25% выделения CO₂, связанных с энергопотреблением, согласно исследованиям [6]. При этом доля эмиссий от легкового автотранспорта составляет половину. Европейский Союз акцентирует на значимости международной кооперации для сдерживания подъема среднегодовых температур в пределах 2°C. Достижение указанного лимита потребует от ЕС сокращения выбросов парниковых газов на 60% к середине XXI века относительно показателей 1990 года. Применение транспортных средств, работающих на альтернативных видах топлива, выступает в качестве наиболее эффективного решения.

Переориентация транспортной индустрии на использование альтернативных источников энергии считается критически важным шагом для достижения глобальных экологических целей. Экологически чистые альтернативные виды топлива позволяют автомобилям значительно снизить выбросы углерода в атмосферу. Такие автомобили, функционирующие не на нефти, а на альтернативных видах топлива, включают в себя транспорт на электричестве, водороде, биотопливе и сжиженном природном газе, обеспечивающие минимизацию экологического воздействия по сравнению со стандартными бензиновыми и дизельными двигателями [7].

1.1 Анализ заменителей традиционного топлива для автотранспорта

1.1.1 Обычное топливо

Традиционные источники топлива для автотранспорта, такие как бензин и дизельное топливо, составляют основу текущей транспортной инфраструктуры. Однако большинство автомобилей в городских условиях демонстрируют низкий коэффициент полезного действия, на уровне 15%. Это означает, что лишь 9 литров топлива из 60-литрового бака используются для движения, тогда как оставшиеся 51 литр превращается в тепловую энергию и вредные вещества [8]. Среди выбросов, производимых этими

видами топлива, находятся оксиды азота (NO_x), оксиды углерода (CO_x), оксиды серы (SO_x), различные углеводороды, летучие органические соединения (ЛОС) и твердые частицы (ТЧ). Количество выбросов углекислого газа (CO₂) от традиционных автомобилей значительно меняется в зависимости от используемых технологий и мощности двигателя. Так, в 2012 году средний показатель выбросов CO₂ для автомобиля составил 120 грамм на километр. Энергетическая плотность бензина и дизельного топлива составляет соответственно 35 мегаджоулей на литр и 32 мегаджоулей на литр [9].

1.1.2 Электроэнергия в качестве источника питания

Электроэнергия представляет собой перспективный вид топлива для транспортных средств. Автомобили на электрической тяге, или электромобили, могут способствовать уменьшению выброса парниковых газов и уменьшению зависимости от нефти и других ископаемых видов топлива. Электромобили функционируют благодаря электричеству. Согласно прогнозам компании BP, к 2030 году доля продаж электромобилей достигнет 8% [10]. Электроэнергия для этих транспортных средств хранится в аккумуляторах. В основном электромобили оснащены электрическими двигателями, которые обеспечивают преимущество в эффективности по сравнению с традиционными двигателями внутреннего сгорания за счет прямого привода колес (рисунок 2). Вопрос аккумулирования энергии остается ключевой инженерной проблемой. В производстве электромобилей используются разные виды аккумуляторов, в том числе свинцово-кислотные, никель-кадмиевые (NiCd), никель-металлогидридные, литий-ионные, литий-полимерные и воздушно-цинковые. Однако, литий-ионные аккумуляторы выделяются на передний план за счет своей высокой энергоемкости и плотности энергии, что делает их предпочтительными для использования в быстроходных электромобилях [10]. Силовая установка электромобиля включает в себя аккумулятор, электродвигатель, систему электронного преобразования и привод колес (рисунок 3).

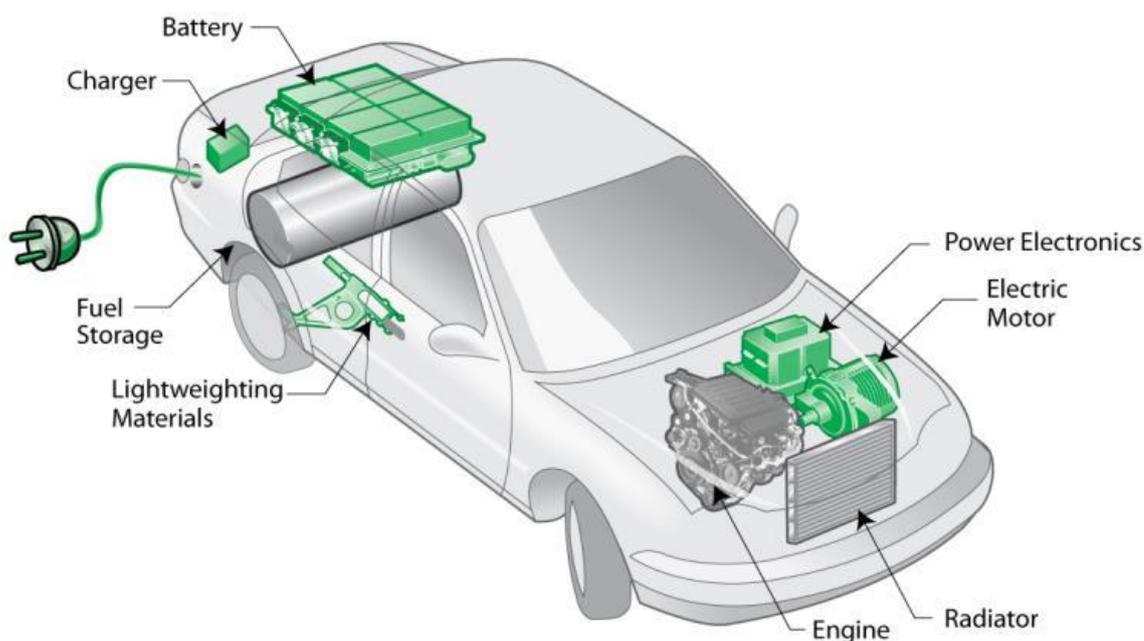


Рисунок 2 – Структурная компоновка компонентов гибридного транспортного средства [11]

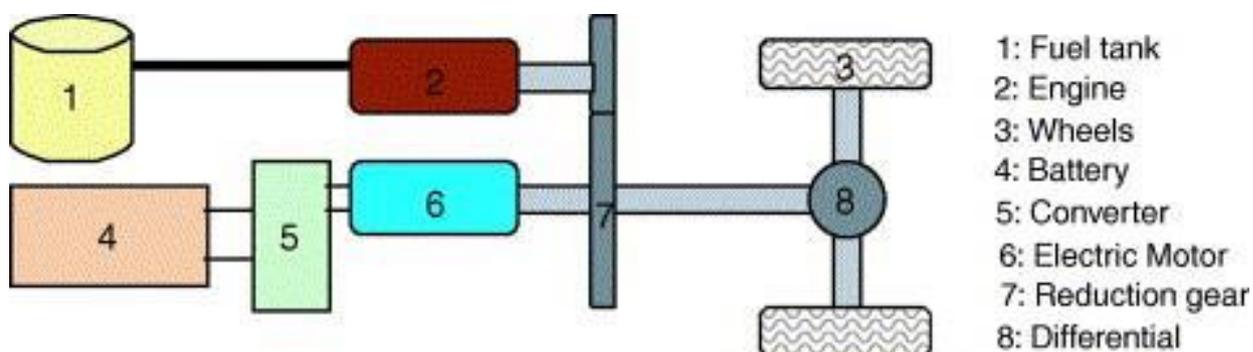


Рисунок 3 – Система привода гибридного автомобиля на электрической тяге [12]

Критическим компонентом электротранспорта является система рекуперативного торможения, позволяющая трансформировать излишки кинетической энергии обратно в электрическую при замедлении. Гибридные электромобили, представляющие собой тип электротранспорта, дополнительно укомплектованы ДВС [13]. Эта конструкция позволяет дезактивировать ДВС, переходя к эксплуатации исключительно на электропривод при соответствующих условиях [14].

1.1.2.1 Атмосферное загрязнение и его последствия для экосистемы

Электромобили не производят выхлопов, что делает их экологически чистыми на дорогах. Контроль за эмиссиями эффективнее осуществлять на электростанциях, что способствует очищению городского воздуха благодаря использованию электротранспорта [15].

Относительно автомобилей с традиционными бензиновыми двигателями, электрические авто представляют собой наиболее продвинутый механизм уменьшения выбросов углекислого газа на пройденный километр. Согласно исследованиям Международного энергетического агентства, электрические транспортные средства имеют показатель выбросов CO₂ на уровне 50 граммов на километр для «на выходе» из колеса. В свою очередь, самые экономичные модели автомобилей, работающих на бензине, сегодня способны генерировать до 100 граммов CO₂ на километр [16].

Эффективность электромобилей в уменьшении выбросов углекислого газа тесно связана с источником энергии, используемым на электростанциях. В случае, если электричество генерируется за счет сжигания угля, уровень выбросов CO₂ электромобилями достигает 200 граммов на километр. Это уменьшает экологические преимущества электромобилей в сравнении с их традиционными аналогами, использующими ископаемое топливо.

1.1.2.2 Энергоэффективность

Обычные ДВС известны своей низкой эффективностью, теряя большую долю вырабатываемой энергии через тепловые потери. В результате, эффективность таких двигателей ограничивается лишь 15-20% от их потенциала. В отличие от них, электромобили используют электродвигатели, которые сохраняют энергию как в активном состоянии, так и во время простоя. Это достигается за счет внедрения технологий, таких как системы регенеративного торможения, позволяющие значительно повысить КПД до 80% [17]. Дополнительное преимущество электромобилей заключается в их способности к накоплению электроэнергии в периоды сниженного спроса, например, ночью, что способствует отдаче избыточной

мощности обратно в энергосистему и увеличивает экономическую эффективность генерирующих мощностей.

1.1.2.3 Эксплуатационные расходы

Зарядка электромобилей значительно экономичнее заправки бензиновых машин, во многом благодаря их эффективной электрической передаче энергии. В качестве примера, в странах Европейского Союза цена за потребление электроэнергии домашними пользователями достигает 0,199 евро за киловатт-час. Электромобили, например Tesla Model S с её литий-ионной батареей, демонстрируют расход в 24 киловатт-часа на сотню километров пробега. Соответственно, затраты на проезд на таком расстоянии оцениваются всего в 4,8 евро [18].

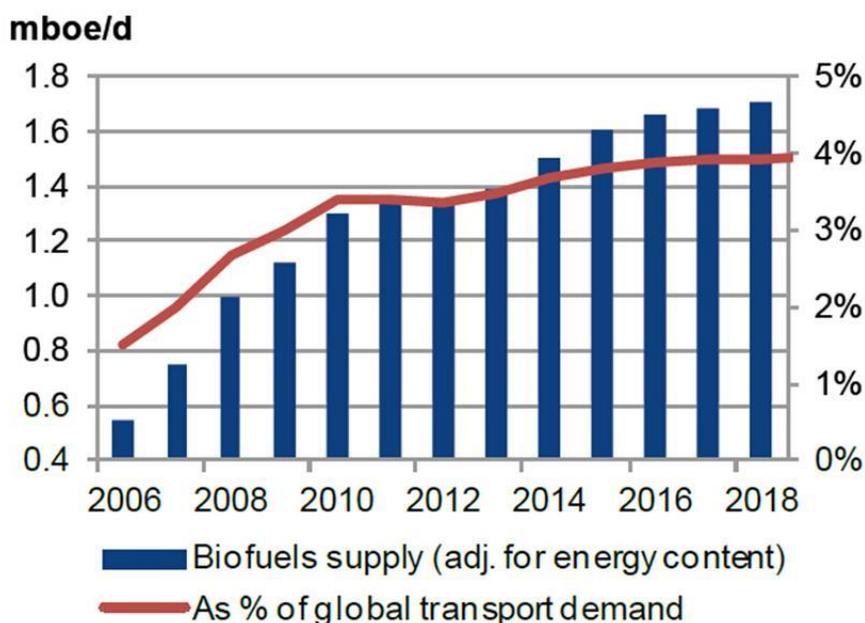
В то время как аналогичный по размерам и мощности традиционный автомобиль с бензиновым двигателем (Benz E 350 с технологией Blue EFFICIENCY) затрачивает 6 литров на сто километров, средняя стоимость бензина на европейском рынке достигает 1,53 евро за литр. Это означает, что расходы на топливо для прохождения расстояния в 100 км равны 9,18 евро. Во второй таблице проведено сравнение характеристик некоторых моделей электромобилей и автомобилей с ДВС, что демонстрируется в исследовании [19].

Тем не менее, стоимость приобретения электромобилей существенно превышает стоимость аналогов с ДВС, основной причиной чего является высокая цена литиево-ионных батарей. В то же время, наблюдается стабильное снижение цен на данные аккумуляторы, благодаря оптимизации производственных процессов. Стоимость киловатт-часа (кВтч) литиево-ионных батарей варьируется в пределах 300-600 долларов, что в сумме составляет 6000-12000 долларов за батарею емкостью 20 кВтч. Прогнозирование показывает, что к 2020 году цены могут снизиться до 300-400 долларов за кВтч. Дополнительно, ввод в эксплуатацию электромобилей потребует затрат на развитие соответствующей инфраструктуры, оцениваемой в 1000-2000 долларов на единицу. В связи с этим,

актуализируется вопрос о необходимости обеспечения государственной поддержки данных инициатив [20].

1.1.3 Биотопливо

Биотопливо представляет собой экологически чистый вид воспроизводимой энергии, добываемой из органических материалов, включая чертужи фруктов, агрокультуры, жировые отходы животного происхождения или другую продукцию аграрного сектора [21]. Ввиду обширного распространения биомассы по всему земному шару, она представляет собой весьма обещающий ресурс для производства энергии. Вследствие увеличения цен на нефтепродукты и выдвигаемых требований к обеспечению энергетической независимости, биотопливо набирает в популярности [23]. За обозримый временной период в 15 лет объемы производства биотоплива на мировом рынке увеличились с 16 миллиардов литров до 100 миллиардов литров. Однако на сегодняшний день биотопливо составляет всего 3% от общей доли используемого в транспорте топлива (согласно статистике, приведенной на рисунке 4) [24].



1 б/д = 58 030,255 л

1 боэ = 240 л этанола; 180 литров биодизеля.

Рисунок 4 – Глобальная экспортно-импортная динамика биотоплива в период с 2006 по 2018 годы. [24]

Однако, согласно прогнозам Международного энергетического агентства, к 2050 году доля биотоплива в глобальном потреблении транспортным сектором достигнет 27% [25, 26]. Процесс производства биотоплива иллюстрируется на рисунке 5, начиная с транспортировки биомассы на заводы по переработке нефти. Здесь биомасса может быть преобразована в энергию либо путем термохимической конверсии, либо с использованием биохимических методов. Завершающим этапом является доставка полученного топлива конечным потребителям.

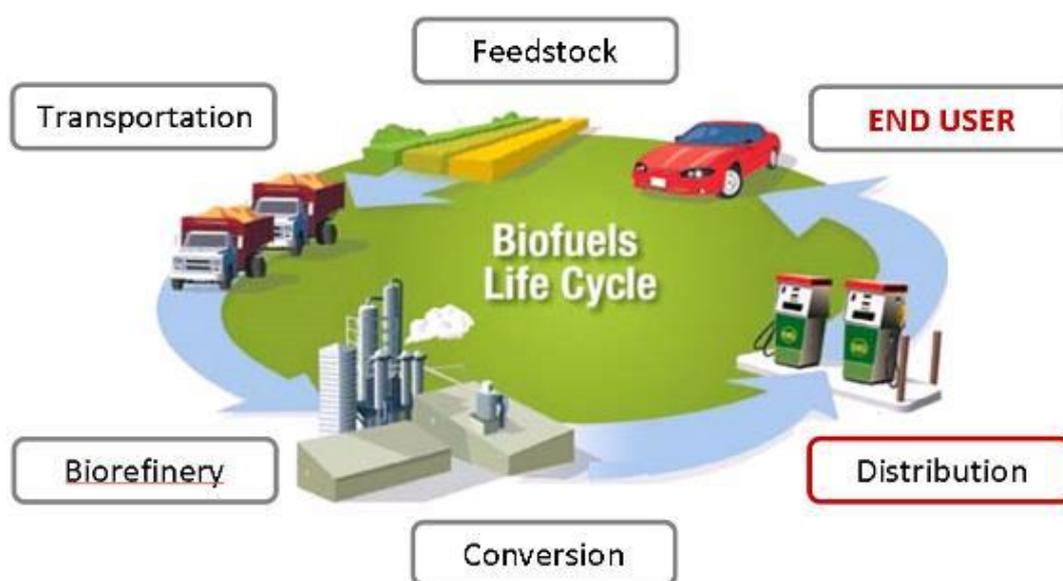


Рисунок 5 – Процесс жизненного цикла биоэнергосносителей [27]

1.1.3.1 Биотопливо первого поколения

Биотопливо классифицируется на различные категории. К первому поколению биотоплива, иначе именуемого традиционным, относятся такие виды, как этанол, биодизель, биогаз и прочие.

С 1970-х годов этанол стал широко применяться как топливо для транспортных средств. Его производят путем ферментации сахаров [28]:



В 2011 году объемы глобального производства этанола достигли 84,6 миллиардов литров, превысив производство биодизеля в четыре раза [29].

Этанол обладает энергетической плотностью на 66% отметки плотности, характерной для бензина, но автомобили на этанольном топливе демонстрируют повышенный тепловой КПД благодаря возможности использовать двигатели с более высоким уровнем сжатия. Часто этанол добавляют к бензину, создавая топливные смеси в различных пропорциях, например, E85, где 85% составляет этанол и 15% бензин [30]. Производство этанола в основном зависит от использования сахара, в результате чего его стоимость может сильно колебаться в зависимости от цен на этот агропродукт.

Биодизель представляет собой экологически чистый тип биотоплива, получаемый из растительных источников, таких как соевые бобы и подсолнечник, а также из жира животного происхождения и использованного кулинарного масла. Этот вид топлива привлекает внимание за счет своих экологических преимуществ, включая более низкий уровень выбросов и возобновляемость. Двигатели внутреннего сгорания, работающие на дизеле, имеют коэффициент полезного действия (КПД) до 44%, что значительно превосходит КПД бензиновых двигателей, максимальное значение которого достигает 30%, обеспечивая тем самым более экономичное потребление топлива. Биодизель можно смешивать с традиционным дизельным топливом в любой пропорции, что позволяет использовать его в стандартных дизельных двигателях без дополнительных изменений [31]. Смеси биодизеля с дизельным топливом обозначаются буквой "B", например, B20 означает 20% биодизеля в смеси. Основное сырье для производства биодизеля сегодня – это продукты питания, такие как соевые бобы, что делает стоимость биодизеля зависимой от рыночных цен на эти продукты. Тем не менее, использование животных жиров и отработанных масел, содержащих свободные жирные кислоты, может привести к получению менее очищенного топлива [32].

Анаэробное разложение органических компонентов без доступа кислорода приводит к образованию биогаза. Этот процесс характеризуется

использованием разнообразного органического сырья, включая кухонные отходы, осадки сточных систем и экскременты животных. Основными компонентами биогаза являются метан, водород и углекислый газ, что делает его ценным ресурсом для различных применений: от систем отопления и кулинарии до выработки электричества и использования в качестве топлива для транспортных средств. Более того, после соответствующей переработки биогаз может конвертироваться в высококачественный природный газ [33].

Метанол обычно синтезируется из природного газа или угля, однако возможно его получение из биомассы. В отличие от этанола, метанол производится более простыми методами и обходится дешевле. Тем не менее, метанол отличается повышенной токсичностью и способностью активно абсорбировать водяные пары из атмосферы.

Диметиловый эфир (DME, CH_3OCH_3) представляет собой перспективный вид альтернативного топлива, получаемый из разнообразных источников, включая природный газ, уголь и биомассу. Его использование возможно в модифицированных дизельных и бензиновых двигателях. Отличительной чертой DME является отсутствие в его составе серы, благодаря чему при сгорании он выделяет существенно меньше оксидов азота (NO_x) и угарного газа (CO), что делает его более экологичным вариантом топлива по сравнению с традиционными видами [34].

1.1.3.2 Биотопливо второго поколения

Биотопливо 2-го поколения, иначе именуемое передовым биотопливом, производится из отходов сельского хозяйства или лингоцеллюлозных остатков. Это биотопливо позволяет уменьшить эмиссию парниковых газов на 60-90% в сравнении с традиционным бензином. Появление биотоплива 2-го поколения стало ответом на ограничения своих предшественников из-за использования продовольственных культур (рисунок 6), что вызывает проблемы для продовольственной безопасности и увеличивает выбросы парниковых газов за счет расширения сельскохозяйственных площадей. Биотопливо нового поколения предлагает более экологически чистое и

устойчивое решение, используя несъедобные целлюлозные материалы через инновационные технологии. Тем не менее, экстракция продвинутого биотоплива представляет технические сложности и пока что не нашла широкого применения на рынке [35].



Рисунок 6 – Первое и второе поколения биотоплива [36]

1.1.3.3 Воздействие на окружающую среду

Биотопливо улучшает энергетический микс и текущее его присутствие составляет 3% на рынке топлива для транспорта.

Дебаты о том, как биотопливо способствует защите окружающей среды, активно ведутся в экологических кругах. В основном, стандартные формы биотоплива, кроме биодизеля, не показывают значительного уменьшения в уровнях выбросов парниковых газов. Использование таких видов, как этанол и обогащенный бензин, не приводит к резкому изменению в объемах выделения углекислого газа, оксидов азота и летучих органических соединений [37].

Этанол излучает слегка повышенные уровни углекислого газа по сравнению с традиционным бензином. Биодизель полностью лишен серы, благодаря чему он способен сокращать формирование кислотных осадков и их воздействие на окружающую среду. В отличие от стандартного

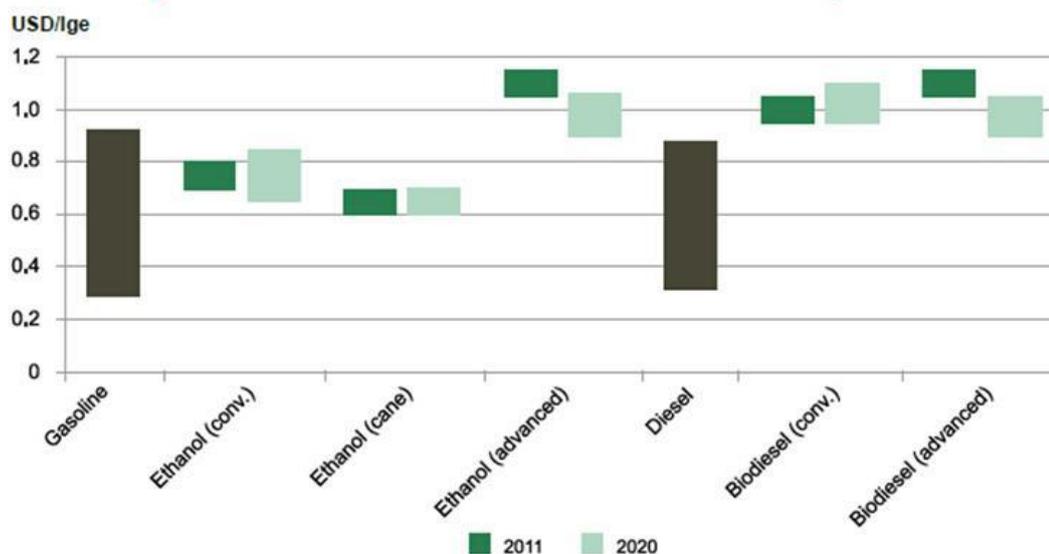
дизельного топлива, биодизель генерирует больше оксидов азота, при этом уменьшая количество выделяемых твердых частиц [41, 42]. Производство биотоплива первого поколения, основывающееся на агрокультурах, требует значительных площадей земли. Анализ его жизненного цикла установил, что это может спровоцировать эрозию почв, дефицит продовольствия и ухудшение качества водных ресурсов. В то же время биотопливо второго поколения использует отходы биомассы, не требуя больших земельных ресурсов, что делает его предпочтительным вариантом для замены топлива первого поколения [38].

1.1.3.4 Содержание энергии

Биоэнергетические продукты обладают сниженной степенью энергоёмкости по сравнению с традиционными углеводородными топливами. К примеру, энергетическая ценность этанола и бензина различается, их отмеченные показатели энергии на литр - 25 МДж и 32 МДж соответственно. В свою очередь, энергия сгорания биодизеля составляет 37 МДж/кг, что уступает показателю стандартного дизеля, который равен 45 МДж/кг. Чтобы биотопливо конкурировало по экономичности с бензином, его стоимость должна быть ниже [39].

1.1.3.5 Операционные издержки

Стоимость автомобиля на биотопливе остается в пределах разумного и выдерживает конкуренцию с аналогами, работающими на ископаемом топливе. Однако стоимость биотоплива напрямую зависит от колебаний на рынке исходного сырья, которое в свою очередь составляет до 45-70% от общей себестоимости производства биотоплива. В глобальном масштабе, традиционное биотопливо уступает в цене бензину. К тому же, современные виды биотоплива обходятся на 35–50% дороже по сравнению с их традиционными аналогами (согласно рисунку 7, демонстрирующий сравнение расходов на производство биотоплива и топлива на нефтяной основе) [40].



Notes: lge = litres of gasoline equivalent; conv. = conventional. Biofuel cost variations can be even larger than depicted here, depending on feedstock and region. The range of gasoline and diesel spot prices is taken from the monthly average spot price in the United States, Singapore and Rotterdam from 2009-11.

Source: IEA analysis based on the IEA Mobility Model, and IEA, 2012.

Рисунок 7 – Сравнительный анализ финансовых издержек на выпуск биоэнергетических ресурсов в противовес стоимости производства традиционных видов горючего, получаемых из нефти [40]

В современной энергетической сфере биоэнергетические продукты требуют активизации государственной поддержки для достижения ценовой конкурентности. Первое поколение биоэнергетиков уже присутствует на рынке, в то время как продукция нового поколения начинает осваивать коммерческие ниши. Согласно аналитике Международного энергетического агентства, за счет прорывов в области технологий и оптимизации процессов производства, к 2030 году биоэнергетики смогут сравняться по стоимости с традиционными углеводородными топливами. В дополнение, прогнозируется значительное ускорение роста доли биотоплива в общем потреблении автомобильного топлива до 7% к 2030 году, что подтверждается аналитическими данными на представленных графиках (рисунок 8) [43].

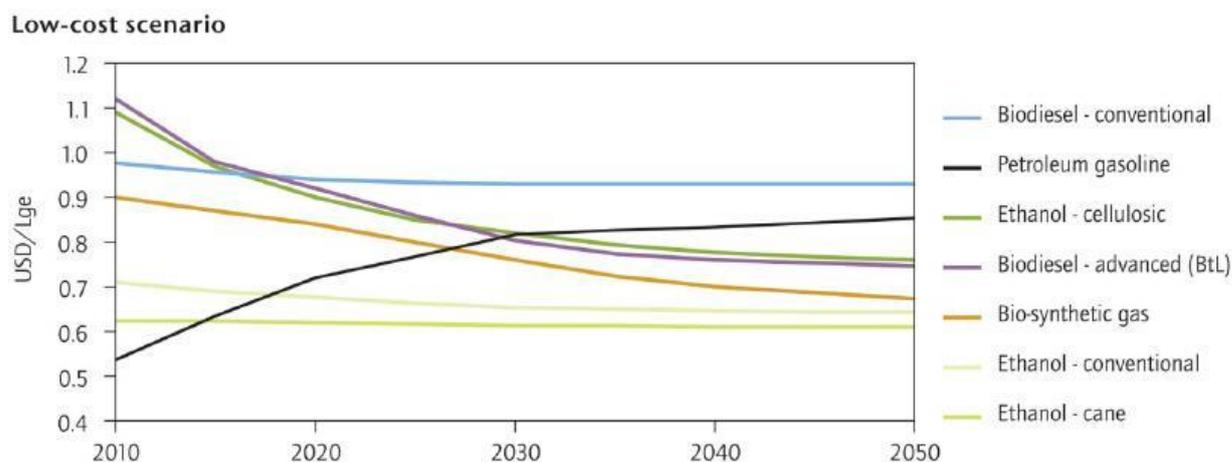


Рисунок 8 – Прогнозируемое изменение стоимости биоэнергоносителей с 2010 по 2050 год[43].

1.1.4 Сжатый воздух

Автомобиль, работающий на сжатом воздухе (CAV), функционирует благодаря энергии сжатого воздуха, высвобождающейся из специализированных емкостей под давлением через пневматический двигатель. В процессе расширения, сжатый воздух превращает свою потенциальную энергию в кинетическую, заставляя двигатель работать. Этот механизм действия аналогичен принципу, лежащему в основе электроавтомобилей, где вместо сжатого воздуха в качестве источника энергии выступают аккумуляторные батареи (рисунок 9). Основное отличие заключается в используемом источнике энергии и продуктах выхлопа, так как автомобили на сжатом воздухе выделяют обратно в атмосферу только очищенный воздух [44].

Выхлопная труба автомобиля на сжатом воздухе останется без загрязнений, но вопрос хранения топлива остаётся актуальным. Ограниченный объём бака и низкая энергетическая плотность сжатого воздуха приводят к тому, что радиус действия такого транспортного средства не превышает 46 км. В дополнение, сравнительная эффективность энергохранилищ на основе сжатого воздуха значительно уступает бензиновым аналогам. Процесс заправки, не являясь изотермическим, способствует дополнительным энергетическим потерям за счёт выделения

тепла. Коэффициент полезного действия (КПД) на уровне 15% для автомобилей на сжатом воздухе демонстрирует их низкую эффективность в сравнении с современными бензиновыми автомобилями, что подтверждается соответствующими исследованиями [45].

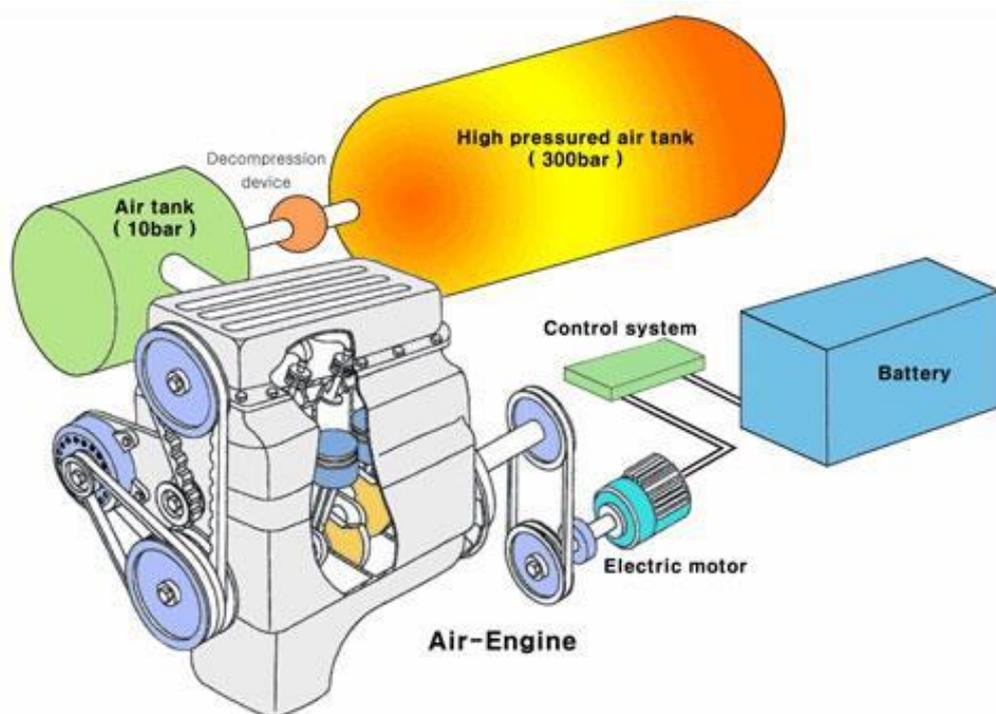


Рисунок 9 – Привод пневматического двигателя [45]

1.1.4.1 Воздействие на окружающую среду

Аналогично другим видам транспорта, которые обходятся без процесса сгорания, эмиссия вредных выхлопов может быть существенно уменьшена.

В то время как использование электрического компрессора для заправки резервуара автомобиля сжатым воздухом приводит к существенным энергетическим затратам, эксплуатация автомобилей на этом типе топлива становится еще более экологически неблагоприятной в сравнении с традиционными и электрическими аналогами. Специфически, когда используется механизм насос-колесо, автомобиль, работающий на сжатом воздухе, генерирует от 1,6 до 2,5 раза больше углекислого газа (CO_2) по сравнению с обычным бензиновым транспортом, и в четыре раза больше, чем

его электрический эквивалент. Эффективность этих транспортных средств подробно представлена в таблице 1, согласно источнику [46].

Таблица 1 – Сравнение производительности транспортного средства на сжатом воздухе с аналогами [46]

	Транспортное средство на сжатом воздухе	Городской бензиновый автомобиль	Городской электромобиль
Тип топлива	Сжатый воздух	Бензин	Батарея
Экономия топлива	38 миль на галлон	32 миль на галлон	163 миль на галлон (е)
Городской диапазон	29 миль	408 миль	127 миль
Выбросы CO ₂ (низкоуглеродистые)	361 г CO ₂ /миль	243 г CO ₂ /миль	184 г CO ₂ /миля
Выбросы CO ₂ (в среднем по США)	626 г CO ₂ /миля	276 г CO ₂ /миль	147 г CO ₂ /миль
Выбросы CO ₂ (углеродоемкие)	721 г CO ₂ /миля	276 г CO ₂ /миль	169 г CO ₂ /миль
Стоимость топлива	0,21 доллара США за милю	0,09 доллара США за милю	0,05 доллара США за милю

1.1.4.2 Энергетическая плотность и экономика

Автомобильный сжатый воздух обладает энергетической плотностью 50 Втч/л, что существенно уступает бензину. Следовательно, дальность движения автомобилей на сжатом воздухе ограничена.

Обслуживание транспортного средства на сжатом воздухе также требует существенных финансовых вложений, порядка 0,21 доллара США за миллион доступных.

Транспорт на сжатом воздухе в настоящий момент испытывает трудности с соответствием стандартам обычного применения [47].

1.1.5 Природный газ (натуральный газ)

Природный газ представляет собой вид ископаемого энергоносителя, наделенный потенциалом для использования в качестве альтернативы бензину. Этот газ, состоящий из углеводородов, включая метан – главный компонент, способствующий атмосферным загрязнениям, дополнительно содержит диоксид углерода и азот. Его месторождения располагаются в угольных пластах под землей или на территории нефтяных полей, где он

применяется в целях обогрева, кулинарии и генерации электричества. В автомобильной сфере газ используется в виде сжиженного (СПГ) или сжатого (КПГ) природного газа. СПГ предпочтительнее для использования в транспортных средствах благодаря меньшему объему хранения под высоким давлением в диапазоне 20-32 МПа, несмотря на необходимость в специализированных баках, увеличивающих объем автомобиля (рисунок 10) [48]. Транспорт на природном газе оценивается как более безопасный вариант по сравнению с бензиновыми аналогами, учитывая легкость газа и легкость его распределения в атмосфере. Преимущество в основном отдается легковым машинам, работающим на КПГ [48].



Рисунок 10 – Топливный бак автомобиля, использующего природный газ в качестве топлива [48]

Сжиженный природный газ (СПГ) обладает в два раза большей энергетической плотностью по сравнению с сжатым природным газом (КПГ), что позволяет его хранение в резервуарах, разработанных для поддержания температуры около минус 165°С при относительно низком давлении в 70-150 psi [49]. Это делает его предпочтительным вариантом для использования в тяжелой технике. За счет высокой плотности энергии, заправка СПГ выходит экономичнее, существенно сокращая потребление электричества на заправке примерно в 100 раз по сравнению с КПГ. Применение природного газа

способствует повышению качества атмосферного воздуха, укреплению энергетической независимости, снижению затрат на эксплуатацию и уменьшению уровня шума в городах, зарекомендовав себя как один из наиболее эффективных вариантов альтернативного топлива. Несмотря на то, что природный газ относится к невозобновляемым ресурсам, разработки в области получения биоприродного газа, включая биогаз, биометан и биосинтетический газ из органических отходов, открывают новые перспективы для экологически чистого топлива.

К тому же, дистрибуция топлива, инфраструктура передачи, ее хранение и процесс заправки транспорта могут стать барьерами для расширения парка автомобилей на сжатом природном газе [50].

Строительство и модернизация газопроводов, а также расширение газовой инфраструктуры являются ключевыми факторами, определяющими стоимость природного газа. При этом рыночная привлекательность природного газа увеличивается в регионах, обладающих развитой и эффективной газоперерабатывающей и транспортной сетью. За последние десять лет динамика распространения газовых автомобилей демонстрирует значительный рост — с 1 миллиона единиц в 2000 году до 11 миллионов в 2009 году, что свидетельствует о повышении спроса на природный газ как топливо. Автомобили на природном газе включают в себя широкий спектр транспортных средств, от двухколёсных до тяжёлых грузовиков. Прогнозируется, что к 2030 году доля природного газа в структуре альтернативных видов топлива значительно возрастет, превысив 10%, и он станет ключевым ресурсом в замещении бензина в краткосрочной перспективе, что отражено на рисунках 11 и 12 [51].

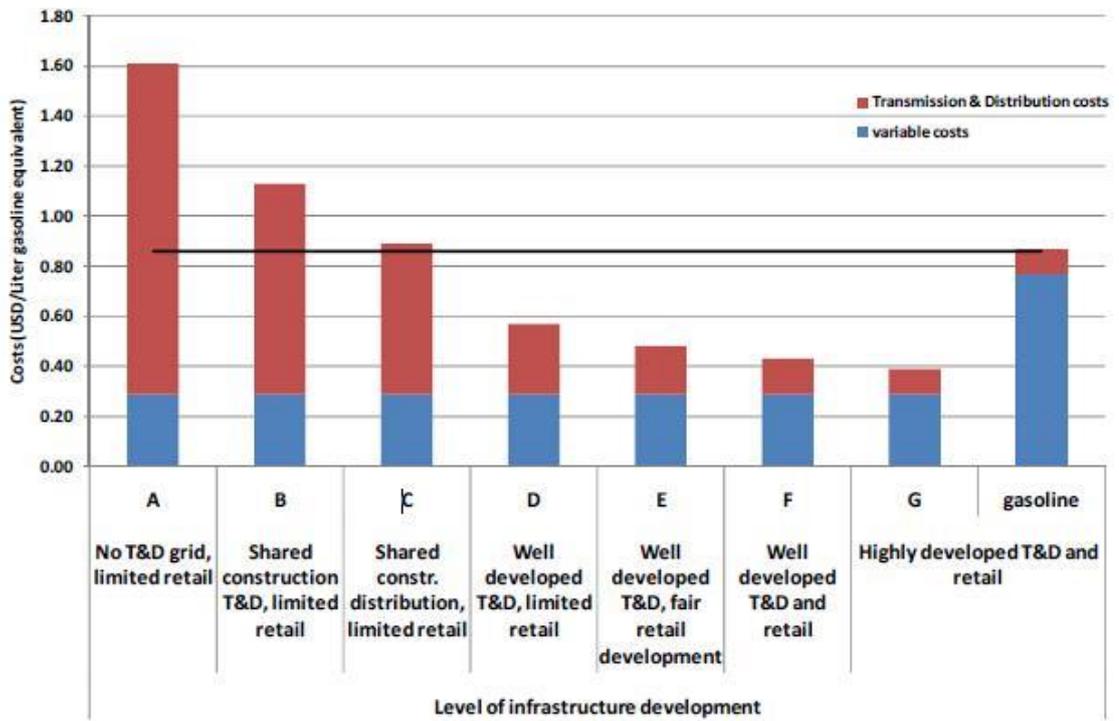


Рисунок 11 – Затраты на КПГ при различных условиях развития сети [51]

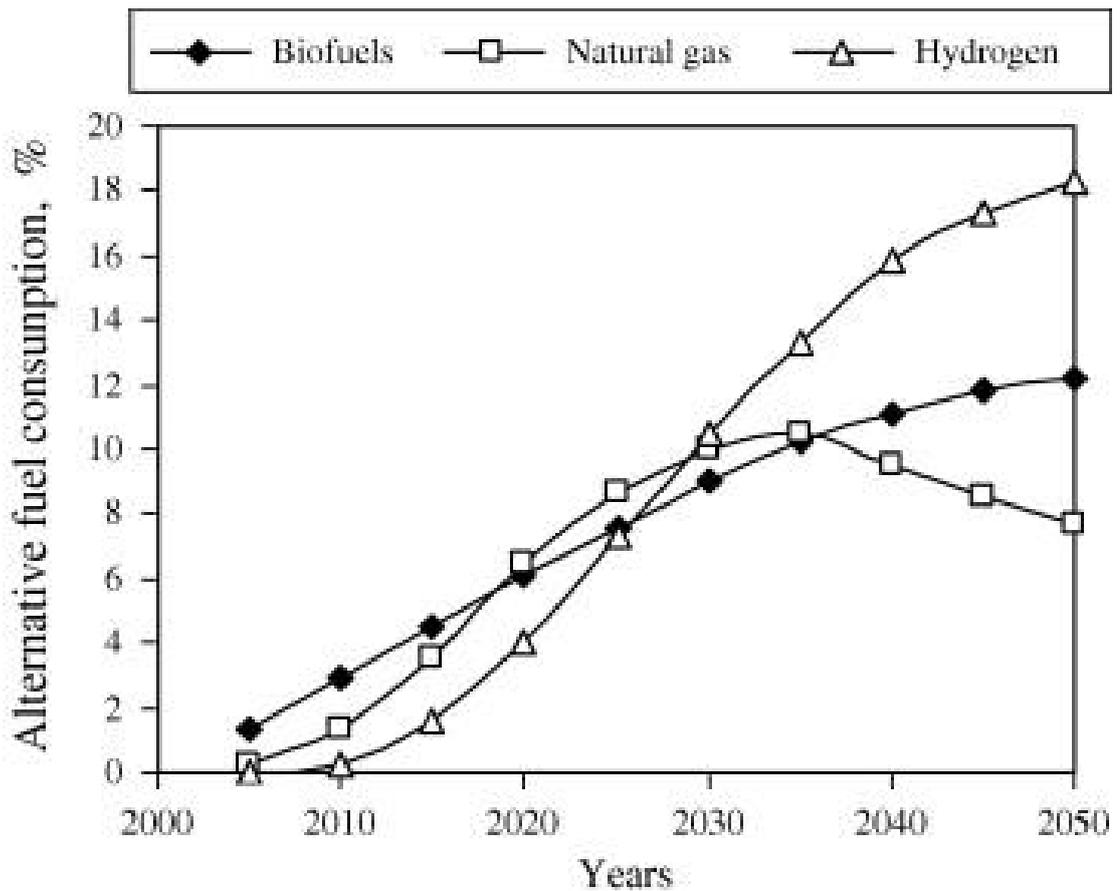


Рисунок 12 – Прогнозируемый процент использования альтернативных источников топлива в общем потреблении топлива для автомобилей в будущем [52]

1.1.5.1 Загрязнение воздуха и воздействие на окружающую среду

Природный газ является наиболее экологически чистым среди всех видов ископаемого энергентов. В обширных сравнительных исследованиях подтверждено, что при его сгорании выделяется на 25% меньше углерода (CO₂) по сравнению с использованием бензина для получения аналогичного объема тепловой энергии, что объясняется наиболее низким показателем выброса CO₂ на единицу выработанной энергии. Кроме того, природный газ производит значительно меньше диоксида серы (SO₂), оксидов азота (NO₂) и твердых частиц по сравнению с другими углеводородными топливами, что делает его предпочтительным выбором с точки зрения снижения атмосферных загрязнений. [53]

1.1.5.2 Содержание энергии

Природный газ имеет меньшую удельную энергетическую эффективность по сравнению с традиционными видами топлива. Энергоёмкость сжиженного природного газа (СПГ) и сжатого природного газа (КПГ) достигает 25 МДж/л и 9 МДж/л соответственно, что составляет 60% и 25% от энергетической ценности дизельного топлива. В связи с этим автомобили, эксплуатируемые на основе природного газа, требуют установки более объемных топливных резервуаров [54].

1.1.5.3 Операционные затраты

На автомобильном рынке представлены многочисленные модели, функционирующие на сжатом природном газе (CNG), включая продукцию таких известных производителей как Volkswagen, Fiat, Mercedes-Benz, Citroen, Peugeot, Volvo и Renault. Применение сжатого природного газа в качестве топлива для автомобилей достигло высокого уровня развития и широкой доступности для потребителей. Отчёт, опубликованный Международным газовым союзом в 2009 году, указывает, что разница в стоимости заправки автомобилей среднего класса природным газом по сравнению с бензином составляла около 2520 евро, что подчёркивает экономическую выгоду этого вида топлива. Благодаря прогрессу в области

технологий, стоимость инфраструктуры для хранения и заправки CNG становится всё более доступной для широкой аудитории.

Автомобиль на бензине возможно модифицировать для эксплуатации на СПГ, при этом оригинальный топливный резервуар остается нетронутым. По данным Министерства энергетики США, такое переоснащение обойдется примерно в 6000 долларов для стандартной модели машины [55].

Цена на природный газ может колебаться в зависимости от стоимости нефти, хотя традиционно ценовые показатели природного газа демонстрируют большую стабильность по сравнению с бензином. В последнее время из-за значительного удешевления природного газа по сравнению с бензином наблюдается сокращение операционных затрат. Согласно исследованиям Британского национального агентства по сохранению чистоты воздуха и защите экологии, использование природного газа обходится на 20-60% дешевле, чем бензиновое топливо, и на 20-40% дешевле, чем дизель.

1.1.6 Водород

Водород служит экологически безопасным топливом для движущихся средств, представляя собой эффективный источник энергии.

Транспорт на водородных топливных элементах превращает энергию реакции водорода в механическую энергию, минимизируя экологический ущерб. Водород, добываемый из множества органических соединений, обладает высокой доступностью.

Автомобили на водородном топливе в основном классифицируются на две категории [56]:

1. Транспортное средство, оснащенное двигателем внутреннего сгорания, работающим на водороде (HICEV).
2. Транспортное средство на водородных топливных элементах.

Двигатель внутреннего сгорания на водороде функционирует по принципу, схожему с бензиновыми агрегатами, где водород сгорает в смеси с

кислородом воздуха, приводя к образованию воды в качестве главного выхлопа.



Следовательно, при работе водородного автомобиля, количество выбросов, попадающих в атмосферу через выхлопную систему, приближается к нулю. Для обеспечения сохранности и компактности заряда, транспорт с водородным двигателем снабжается резервуаром, работающим под высоким давлением. В сравнении с традиционными бензиновыми двигателями внутреннего сгорания, эффективность водородного двигателя находится на сопоставимом уровне – приблизительно 20-30 процентов. Автомобили на топливных элементах генерируют электроэнергию для питания электродвигателей посредством химической реакции между топливом и кислородом, при этом водород является предпочтительным топливом. Экологический след транспортных средств на топливных элементах незначителен, основной его частью являются вода и тепло. Эти транспортные средства могут достигать КПД в диапазоне 40-60%, что значительно превышает показатели двигателей внутреннего сгорания [57]. На рисунке 13, представлена схема работы водородного автомобиля на топливных элементах.

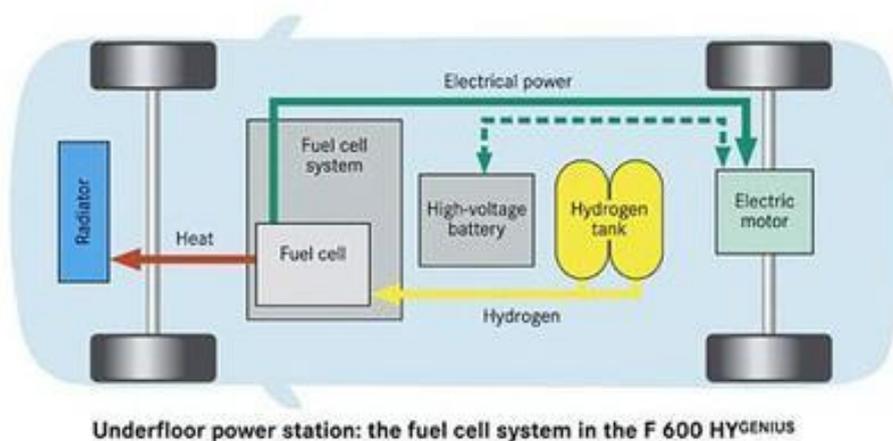


Рисунок 13 – Система передачи автомобиля на водородных топливных элементах Mercedes-Benz F600 [58]

Тем не менее, внедрению водородной энергетики препятствуют определенные вызовы. Прежде всего, добыча водорода может оказывать неблагоприятное влияние на экологию. В своем натуральном состоянии водород не встречается на Земле как самостоятельный элемент. Глобально, около 95% водорода получают из метана, при этом на долю процесса парового риформинга природного газа приходится 48%. Основные способы извлечения водорода из углеводородов включают: метод парового риформинга, метод частичного окисления и процесс ауто-термического риформинга [59]. В наши дни лишь малая часть водорода производится за счет возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия и биоводород. В случае использования солнечной энергии, сначала она превращается в электроэнергию, после чего проводится электролиз воды для получения водорода. Кроме того, для генерации водорода могут быть использованы биомасса и ветровая энергия.

В рамках возобновляемых энергетических технологий не происходит непосредственного использования ископаемых видов топлива, что снижает риск для энергетической надежности страны. Тем не менее, текущие затраты на такие технологии остаются высокими, а темпы выработки энергии – относительно низкими.

Во-вторых, на данный момент не разработана необходимая инфраструктура для обеспечения цикла работы с водородом, включая станции для его заправки и трубопроводы для транспортировки. Это означает, что водород вряд ли сыграет ключевую роль в ближайшем будущем, до 2020 года, однако предполагается, что он станет критически важной технологией на долгосрочную перспективу [60].

1.1.6.1 Атмосферное загрязнение и его последствия для экосистемы

Одной из ключевых выгод применения водородных автомобилей является их способность существенно снижать уровень загрязнения, выпускаемого через их выхлопные системы. Эти транспортные средства, функционирующие на основе водорода, отличаются практически полным

отсутствием вредных выбросов. Однако процесс стандартного получения водорода может привести к нежелательным экологическим последствиям, включая увеличение эмиссии парниковых газов. Таким образом, экологическая выгода от использования водородного топлива оказывается нивелированной при его изготовлении обыденными методами.

Сегодня методы генерации водорода ограничены узким спектром. Рисунок 14 демонстрирует параметры выбросов разнообразных методик [61].

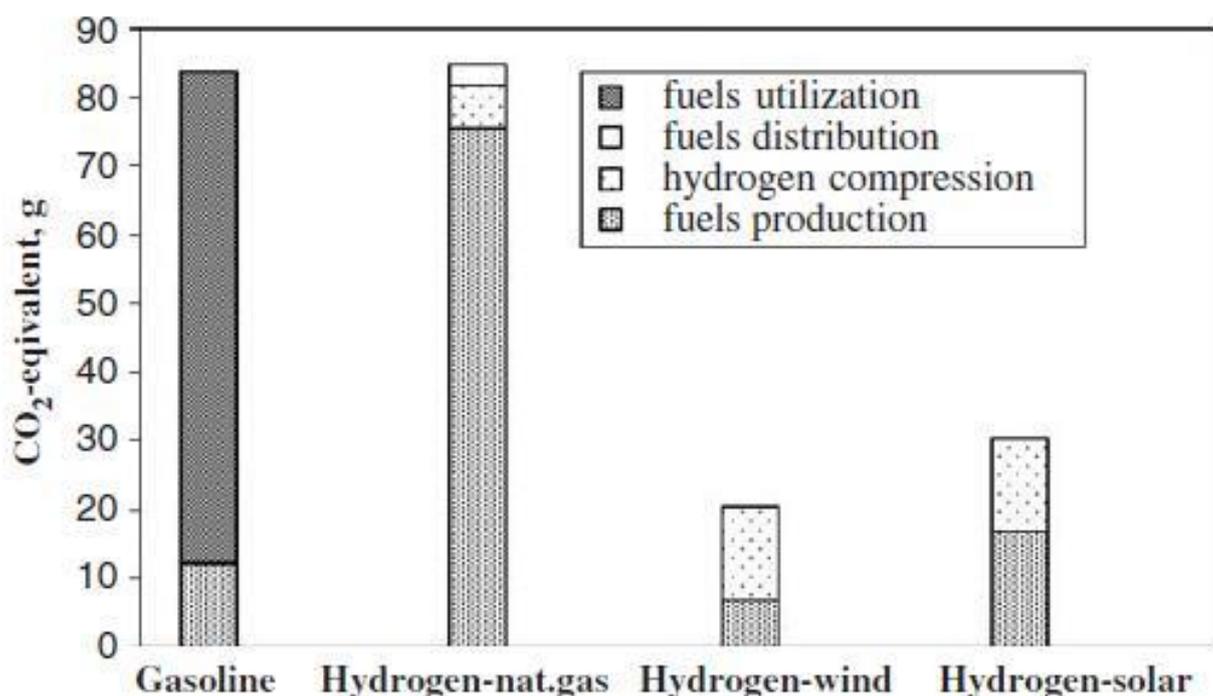


Рисунок 14 – Эмиссия парниковых газов на этапах производства и эксплуатации 1 МДж бензина и водорода [62]

1.1.6.2 Содержание энергии

В контексте энергетической эффективности, энергетическая плотность бензина, составляющая 32 мегаджоулей на литр, значительно превосходит показатели водорода: 5,6 МДж/л для сжатого и 8,5 МДж/л для жидкого агрегатного состояния. Это обуславливает необходимость в создании адаптированных методов хранения водорода, способных обеспечить его сохранность при высокой плотности, требуя при этом особенных условий, включающих высокое давление и экстремально низкие температуры [63].

1.1.6.3 Затраты на обслуживание

Сегодня ценник авто на водородной тяге значительно превышает стоимость их аналогов, работающих на традиционном топливе. Автомобили с двигателями внутреннего сгорания на водороде не выпускаются серийно, хотя было представлено несколько таких моделей в качестве демонстрационных образцов. В то же время, в последние несколько лет на рынок поступило несколько моделей, оснащенных водородными топливными элементами. К примеру, Toyota заявила в 2015 году о начале продаж своего водородного автомобиля на топливных элементах по цене 60 000 евро. На рисунке 15 представлено сравнение характеристик водородного автомобиля с другими транспортными средствами аналогичного размера (преобразование 1 миля = 1,6 км, MPG: эквивалент миль на галлон). В таблице 2 детально сравниваются технические параметры транспортных средств на основе их работы от водорода и бензина [64, 65].

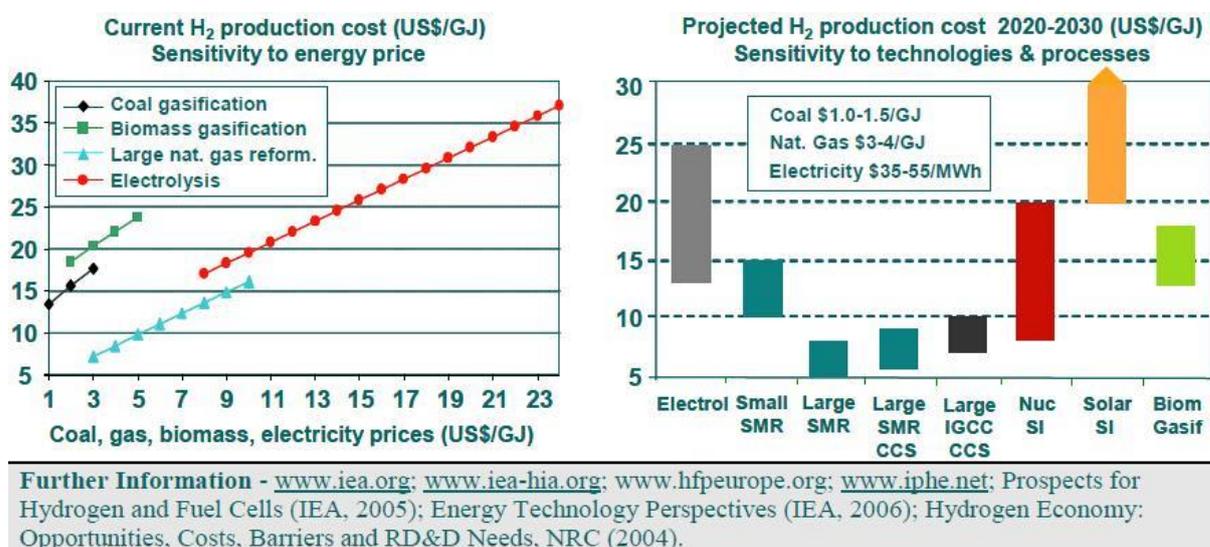


Рисунок 15 – Цена производства водорода различными методами [66]

Ценовая динамика водорода тесно связана с изменениями стоимости других видов топлива. Прогнозируется, что в 2007 году затраты на производство водорода достигнут 50 долларов США за гигаджоуль, но в течение следующего десятилетия ожидается падение цен до отметки в 10-15 долларов США за гигаджоуль. Значительная переменчивость цен

обусловлена разнообразием исходных материалов для производства. Текущая стоимость производства водорода методами, минуя использование ископаемых видов топлива, остается высокой по экономическим меркам. В частности, процесс получения водорода с использованием солнечной энергии может быть в пять раз более затратным по сравнению с его добычей из угля. Иллюстрации 16 и 17 демонстрируют разброс стоимостных показателей водорода, получаемого различными методами, а также проводят анализ ценообразования на водород с целью его конкурентоспособности на рынке топлива в сравнении с бензином [67].

Таблица 2 – Сравнение характеристик транспортных средств при использовании водорода и бензина [66]

	Hyundai ix35 FCEV	Hyundai ix35 2015	Toyota Mirai	Toyota Camry 2015
Класс автомобиля	Компактный внедорожник	Компактный внедорожник	Среднеразмерный седан	Среднеразмерный седан
Двигатель	Топливный элемент + двигатель	2,0 л бензина	Топливный элемент + двигатель	2,5 л бензина
Власть	100 кВт	122 кВт	114кВт	133 кВт
Экономия топлива	49 миль на галлон	23 мили на галлон	60 миль на галлон	28 миль на галлон
Ускорение 0-100км/ч	12,5 с	12 с	10,4 с	9,3 с
Максимальная скорость	160 км/ч	183км/ч	175 км/ч	>200 км/ч
Выбросы CO2	0 г/км	150 г/км	0 г/км	116 г/км
масса	2290 кг	1500 кг	1850 кг	1510 кг
Емкость бака	144 л (70 МПа)	58 л	122,4 л (70 МПа)	64 л
Диапазон	594 км	700+км	650 км	700+км
Цена энергии (долл. США)	2-4/галлон	3,34 /галлон	2-4/галлон	3,34 /галлон
Стоимость/100 км (долл. США)	2,6 - 5,1	9.1	2,1 - 4,2	7,5
Стоимость модели (долл. США)	144 400	25 000	57 500	27 000

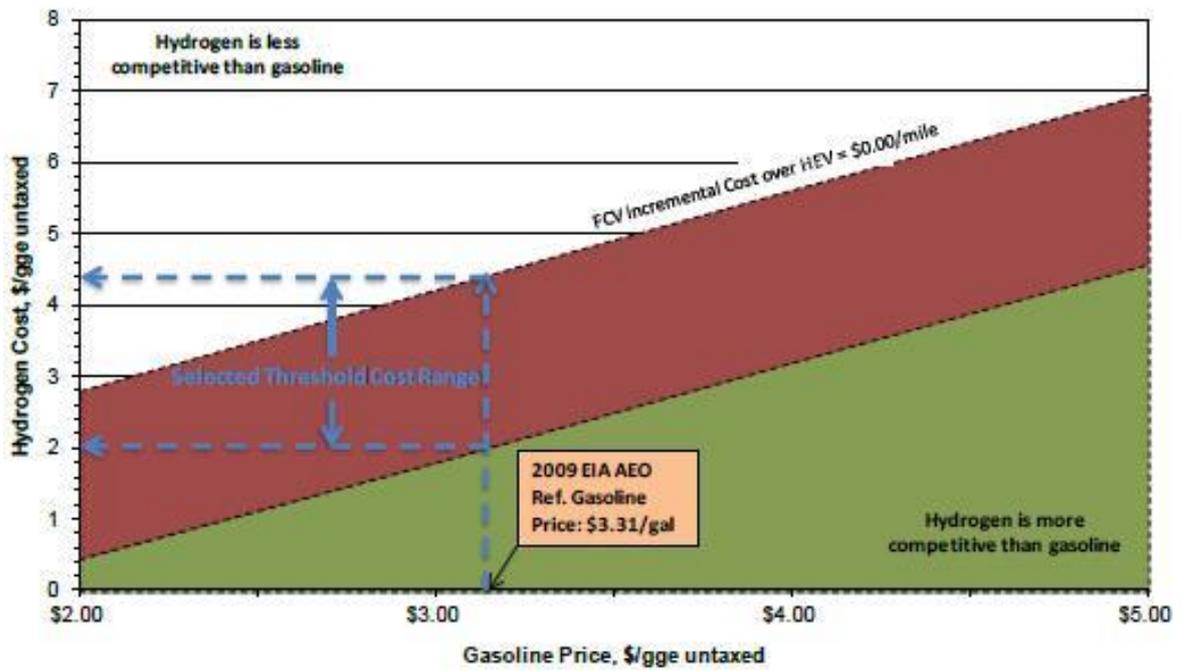


Рисунок 16 – Стоимость водорода для конкуренции с бензином [68]

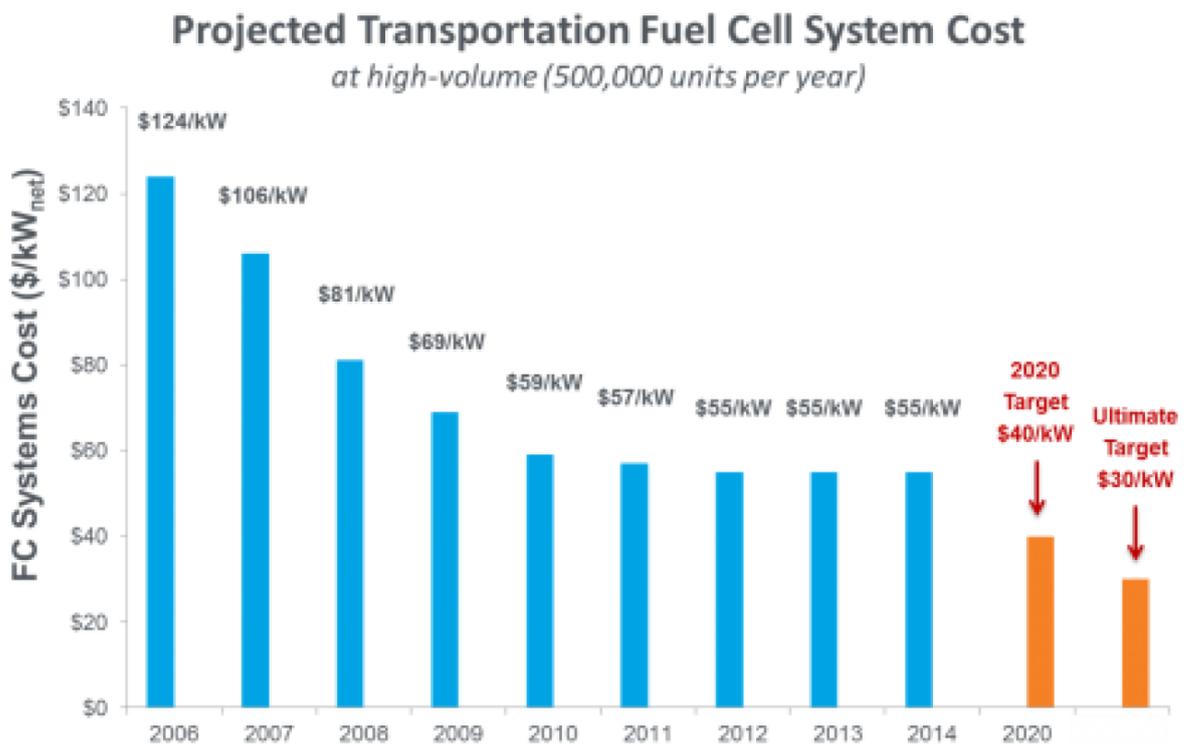


Рисунок 17 – Ожидаемые изменения цены на топливные элементы в период с 2006 по 2020 год [69]

Во-третьих, развертывание структуры для газоснабжения водородом может представлять собой значительный барьер, связанный с увеличением издержек. Экспансия инфраструктуры, охватывающая транспортировку и

точки заправки водородом, повлечет за собой повышение первоначальной стоимости водорода на 4-11 долларов США за гигаджоуль [68]. В заключение, для успешной замены конвенциональных автомобилей на альтернативные с топливными элементами, последние должны стать экономически доступнее. За прошедшие десять лет наблюдается значительное сокращение стоимости производства топливных элементов.

1.1.7 Сжиженный нефтяной газ

Сжиженный нефтяной газ (СНГ), известный также как LPG или пропан-бутановая смесь, является популярным экологически чистым и эффективным альтернативным видом топлива, состоящим из пропана (C_3H_8) и бутана (C_4H_{10}). Этот газ находит широкое применение в различных областях, таких как отопление жилищ, приготовление пищи, рефрижерация и в качестве моторного топлива, которое обычно получают из нефти или природного газа. К 2008 году около 14,8 миллионов транспортных средств по всему миру эксплуатировались на СНГ. Благодаря высокому октановому числу (105), что существенно превышает показатель обычного бензина (95), LPG идеально подходит для использования в двигателях внутреннего сгорания. Автомобили на бензине могут быть переоборудованы для работы на СНГ, что требует установки специализированного топливного бака, поддерживающего высокое давление (760-1030 кПа), чтобы обеспечить условия для хранения газа в жидком состоянии при пониженной температуре [70]. Несмотря на производство из невозобновляемых источников, энергетическая стабильность СНГ аналогична биодизелю и превосходит сжиженный природный газ (СПГ), повышая его энергетическую безопасность. Дополнительно существуют технологии, позволяющие производить СНГ из биомассы, что способствует улучшению его экологических характеристик [71].

1.1.7.1 Атмосферное загрязнение и его влияние на экосистемы

Многочисленные ученые убеждены, что применение сжиженного нефтяного газа способствует уменьшению выбросов угарного газа, твердых

частиц, оксидов азота и летучих органических соединений [72]. Возрастает экологичность: при сгорании сжиженного нефтяного газа выбросы твердых частиц в 10 раз ниже, чем из-под дизельных двигателей [73].

Уровни выбросов углекислого газа (CO_2) у транспортных средств на сжиженном нефтяном газе (СНГ) в настоящее время практически не отличаются от таковых у авто на бензине.

1.1.7.2 Калорийность и затраты на обслуживание

Энергетическая плотность сжиженного нефтяного газа (СНГ), составляющая 26 МДж/л, представляется менее энергонасыщенной по сравнению с бензином. Транспортные средства, использующие СНГ, демонстрируют энергоэффективность на 10-15% ниже, чем аналоги, работающие на дизельном топливе, что ведет к увеличению потребления газового топлива на 35-50% по сравнению с дизельными двигателями. Тем не менее, экономическая выгода от использования СНГ все же остается, поскольку эксплуатационные расходы на газ оказываются ниже за счет более низкой стоимости топлива по сравнению с бензином, с учетом того, что в Европе цена на СНГ может составлять всего лишь половину от стоимости бензина [74].

1.2 Анализ перспектив использования альтернативных видов топлива

1.2.1 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 3 представлено сопоставление разных характеристик топлив. За основу взят бензин.

Таблица 3 – Выбросы СНГ в сравнении с другими видами топлива (г/км) [75]

	ТНС	NMHC	CO	NOx	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 краткосрочной и среднесрочной альтернативой использованию автомобилей на бензине. Рынок пополнился моделями электромобилей, предлагающими идеальное решение для использования в городских условиях [76]. 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 [77]. Это подчеркивает ключевую роль биотоплива в процессе постепенного отказа от традиционных видов топлива как на ближайшую, так и на отдаленную перспективу (таблица 4). Однако существуют и определенные осложнения при переходе на биотопливо. 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.

Таблица 4 – Свойства различных топлив [78]

	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	низкий	середина
СПГ	CH ₄	Подземные запасы	Сжатый газ	производства, возобновляемый	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

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 [79].

1.2.2 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 18 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.

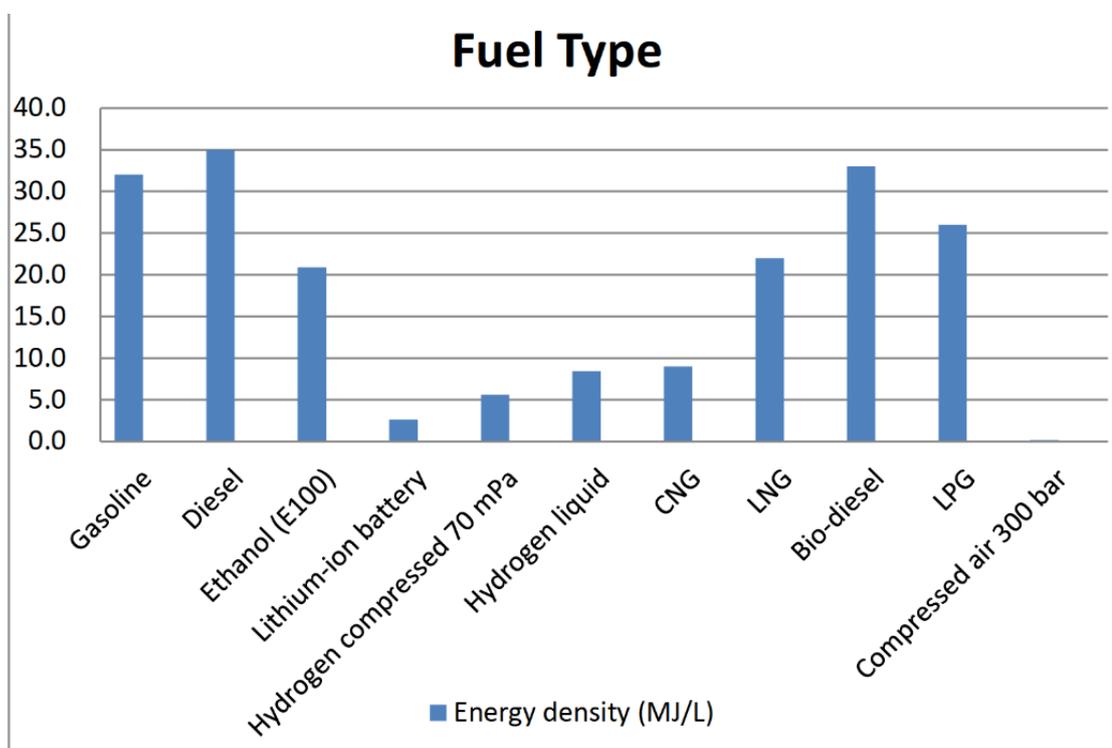


Рисунок 18 – Плотность энергии для различных видов топлива [80]

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% [80].

Выводы по 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.

Давно в применении находятся как сжатый природный газ, так и сжиженный нефтяной газ. Их разработки - продвинутые и стабильные. Эффективное сокращение выбросов и сниженные операционные издержки указывают на значительный потенциал этих топливных ресурсов как альтернативных источников энергии в ближайшей перспективе.

Электрические автомобили характеризуются низким уровнем эмиссии парниковых газов, причём последние годы принесли значительные технологические прорывы в этой области. Однако развитие зарядной инфраструктуры и высокая стоимость остаются ключевыми барьерами для их широкого распространения. Экономия за счёт масштабного производства должна сделать их более доступными на рынке. Электромобили представляют собой перспективный способ перехода от использования ископаемого топлива, особенно с учётом перехода на электроэнергию из возобновляемых источников в обозримом будущем.

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.

Сегодня водородная технология не может полностью заменить углеводородные энергоносители, несмотря на свой низкий уровень углеродного следа. Хотя затраты на эксплуатацию водородных систем оказываются меньше, основная доля его производства пока зависит от использования не возобновляемых источников энергии. Впрочем, водород обладает потенциалом стать ключевым игроком в энергетическом переходе на века вперед. В то же время, технологии автомобилей на основе сжатого воздуха ещё не достигли уровня, позволяющего их рассматривать как полноценную альтернативу традиционным видам топлива.

Ограничения, связанные с технологиями хранения топлива, методами заправки, автономностью передвижения и затратами на изготовление, затрудняют внедрение и распространение автомобилей на сжатом воздухе в коммерческом сегменте.

Глава 2 Моделирование двигателя

2.1 Модель двигателя для исследования

Исследование работы двигателя, используя разнообразные виды альтернативных топлив, осуществлялось в среде программного обеспечения Ricardo Wave версии 19.1. Визуальное представление архитектуры модели демонстрируется на рисунке 19.

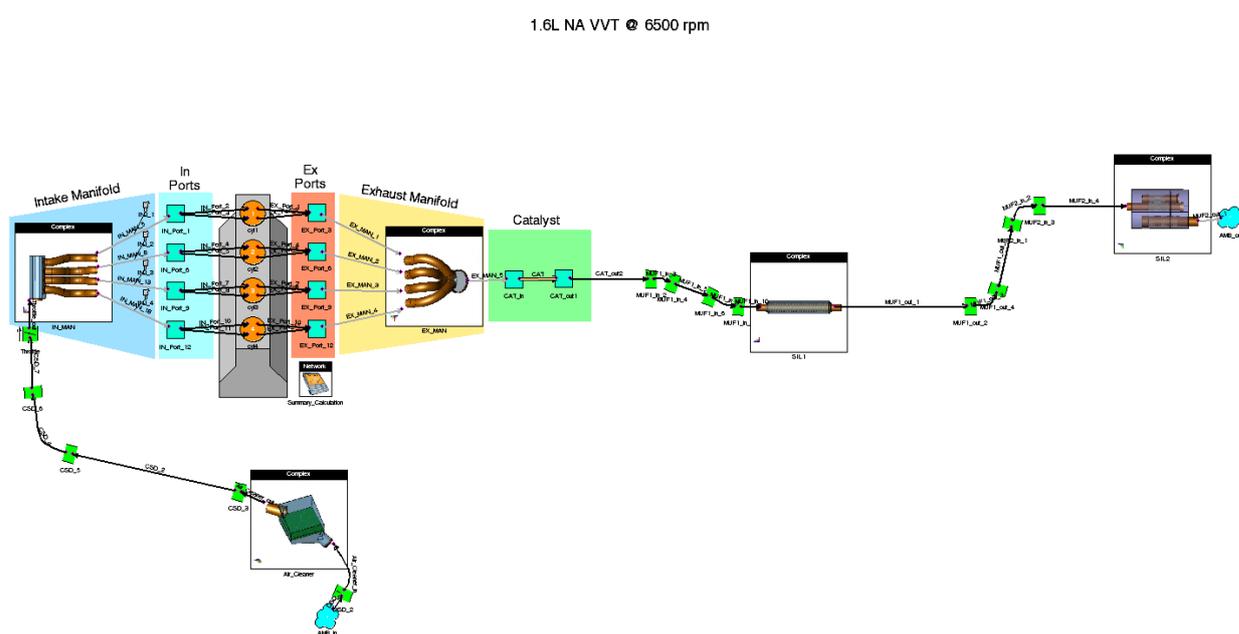


Рисунок 19 – Модель четырехцилиндрового атмосферного двигателя на жидких топливах

2.1.1 Модель горения Мульти-Вибе

Мультимодальная подмодель горения Мульти-Вибе предоставляет возможность комбинировать от одной до восьми кривых Вибе, тем самым формируя комплексный профиль горения. Это обеспечивает адекватное моделирование базовых профилей горения, характерных для одиночных, двойных или тройных кривых Вибе, обычно применяемых при анализе работы бензиновых (SI) и дизельных двигателей. Кроме того, предоставляется возможность реконструкции более сложных профилей

горения, что актуально для учета эффектов от предварительного и отложенного впрыска топлива [81].

Это универсальная базовая модель горения, адаптируемая для всех видов двигателей, будь то дизельные или с искровым воспламенением.

Эта уникальная конфигурация сгорания поддерживает мульти-топливное горение, обеспечивая возможность использования как гомогенных (заранее смешанных), так и гетерогенных (несмешанных) топливных смесей внутри цилиндра.

При использовании одного вида топлива, характеристики сгорания объединяются в совместный график. В случае сгорания разных видов топлива, графики сгорания интегрируются, формируя отдельные графики для процессов сгорания с предварительным смешиванием топлив и без него.

Кривые Вибе представляют собой графическое изображение процессов теплового высвобождения в двигателе (отображаемые как красная линия на рисунке 20), ключевым образом влияя на скорость его горения. Экспонента, входящая в функцию Вибе, играет решающую роль в формировании профиля данной кривой. Значение этого показателя в меньшую сторону вызывает перемещение пика горения влево, что соответствует более раннему возгоранию, в то время как увеличение показателя переносит пик вправо, указывая на более позднее начало горения. Для интеграции кривой в цикл работы двигателя используется определение трех ключевых моментов сгорания (визуализированных на синей кривой в виде ромбовидных маркеров). Центральный момент сгорания определяется по отношению к верхней мертвой точке (ВМТ), при этом длительность горения охватывает как ранний, так и поздний этапы, располагаясь симметрично относительно этой центральной точки.

В демонстрируемом примере, место 50-процентного сгорания топлива определено на удалении 7 градусов от верхней мертвой точки (ВМТ). Указанный период сгорания, соответствующий изменению на 10 градусов по углу поворота коленвала, характеризует процесс горения от 10% до 90%.

График адаптирован так, чтобы точки, отмечающие начало (10%) и завершение (90%) горения, находились при 2,5 и 12,5 градусах соответственно от ВМТ.

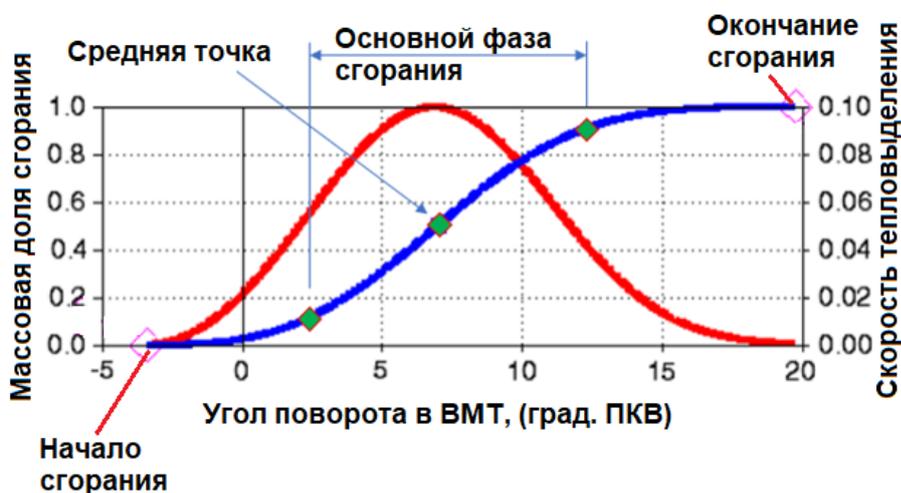


Рисунок 20 – Модель горения мульти-Вибе

В модели Multi-Vibe типичны параметры, такие как средняя точка сгорания и время горения от начала 10% до 90% потребления массы топлива, которые можно адаптировать, модифицируя пропорцию горящего топлива в каждом из анализируемых сегментов кривых Вибе.

В рамках процесса анализа, все кривые Вибе были приведены к общему масштабу для точной оценки потребления топлива по каждой из них. При этом, кривые с присвоенным значением ноль не учитываются в расчетах.

Этап 1. Фаза инициации сгорания определяет начальный участок криволинейного процесса горения. Стандартно, пропорция этого этапа составляет 0,1, что соответствует 10% выгорания.

Пункт 2. Стандартное положение средней точки горения составляет 0,5, что соответствует 50% сгорания.

Точка 3. Конечный этап основного процесса горения по умолчанию установлен на уровне 0,9, что соответствует 90% выгорания топлива.

Эти фундаментальные параметры могут модифицироваться в диапазоне от 0 до 1,0, увеличиваться или уменьшаться.

Таким образом, может быть определён коэффициент завершённости горения. В этом случае, профиль применяется как введённый (нормализованный до 1), однако процесс сгорания останавливается по достижении установленного уровня сжигания. Этот метод часто применяется в симуляциях неполного окисления.

Кроме того, можно добиться снижения объема сожженного топлива, используя метод масштабирования кривой тепловыделения, в результате чего уменьшение объема сгоревшего топлива будет сопровождаться соответствующим сокращением общего профиля.

Каждый график скорости горения адекватно аппроксимируется функцией Вибе. Эта формула способна адаптироваться к разнообразным профилям скорости горения, характерным для дизельных моторов с многократным впрыском топлива и агрегатов на основе искрового зажигания.

В контексте анализа характеристик горения внутри двигателей внутреннего сгорания, безразмерная интегральная скорость горения W при определённом положении угла поворота коленчатого вала θ может быть определена через функцию Вибе:

$$W = 1 - \exp \left[-a \cdot \left(\frac{\theta_i}{\theta_0} \right)^{(m+1)} \right]. \quad (1)$$

Он включает в себя три неизвестных параметра: фактор полноты сгорания (a), показатель степени (m) и начало горения (θ_0), которые могут быть определены либо трехточечной аппроксимацией, двухточечной аппроксимацией с заданным показателем степени функции Вибе, либо односточечной аппроксимацией плюс заданная продолжительность горения и заданный показатель характера сгорания (m) в модели Вибе.

В случае, когда график скорости горения формируется с помощью нескольких функциональных элементов Вибе, итоговая скорость горения представляет собой,

$$W = \sum_n f_n \cdot W_n. \quad (2)$$

Через точную настройку как форм, так и соотношений компонентов в функции Вибе, основываясь на коэффициентах массового содержания топлива, возможно вычислить детализированную характеристику скорости сгорания. Это применимо к дизельным моторам с фазированным впрыском и агрегатам, работающим на принципе воспламенения от искры, как варианты с смешанным топливом, так и при прямом впрыске с формированием стратифицированного заряда.

2.1.2 Зажигание однородного топливно-воздушного состава с помощью электрической искры

Непосредственно после возникновения электрической искры формируется компактный очаг пламени. В этой инициализирующей стадии, известной как стадия пробоя, пламенный очаг представляет собой плазменное образование с температурным показателем в районе 60000 К, которое сопровождается высвобождением заметного количества тепловой энергии. Этот момент следует очень мгновенный интервал времени, порядка 10 миллисекунд, в течение которого газы испытывают стремительное охлаждение, переходя через этап дугового разряда к состоянию тлеющего разряда. На этом этапе, температура пламенного очага стабилизируется вблизи 3000 К. Упрощенно пропуская тонкости фазы тлеющего разряда, рассматриваемая модель предполагает, что искровая энергия всегда достаточна для гарантирования успешной активации зажигания, где эмпирический фокус смещается на анализ теплового расширения в ходе стадий пробоя и дуги, длившихся приблизительно 50 мс.

В непосредственной близости к свече зажигания, поле потока оказывает значительное воздействие на процесс передачи энергии от поступающего электрического тока к энергии электрического искрового разряда, необходимого для инициирования горения. Поведение канала разряда меняется под влиянием поля потока, что приводит к его удлинению.

Это изменение конфигурации канала приводит к повышению отношения величины напряжения в дуговом канале против потерь на электродах, что в итоге сокращает тепловые потери на аноде и катоде. В стадии формирования дугового разряда, ссылаясь на исследования Хервега и Мали, устанавливается связь между эффективностью переноса энергии и действующим в этой области полем потока:

$$E_{\text{эфф}} = \eta_{\text{искры}} \cdot E_{\text{мощн.искры}} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{искры}} = \eta_{0,\text{искры}} + \frac{(\eta_{\infty,\text{искры}} - \eta_{0,\text{искры}}) \cdot U_{\text{искры}}^3}{A_{\text{искры}} + U_{\text{искры}}^3} \quad (4)$$

Следовательно, оптимизированная по времени трансфертная способность энергии может быть синхронизирована и применена в оценке скорости распространения пламени, индуцированного искровым разрядом:

$$S_{\text{Искры}} = 0,4811 \cdot \left(\frac{E_{\text{эфф}}}{\rho \cdot C_p} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot \left(\frac{2 \cdot \lambda_0 \cdot T_0}{2 \cdot \rho \cdot C_p \cdot \sqrt{T_0}} \right)^{\frac{2}{7}} \cdot t^{-\left(\frac{5}{7}\right)} \quad (5)$$

Заметьте, что скорость распространения пламени, инициированного искрой, будет убывать с течением времени, изменяясь в обратной пропорциональности к его продолжительности.

2.1.3 Распространение фронта пламени

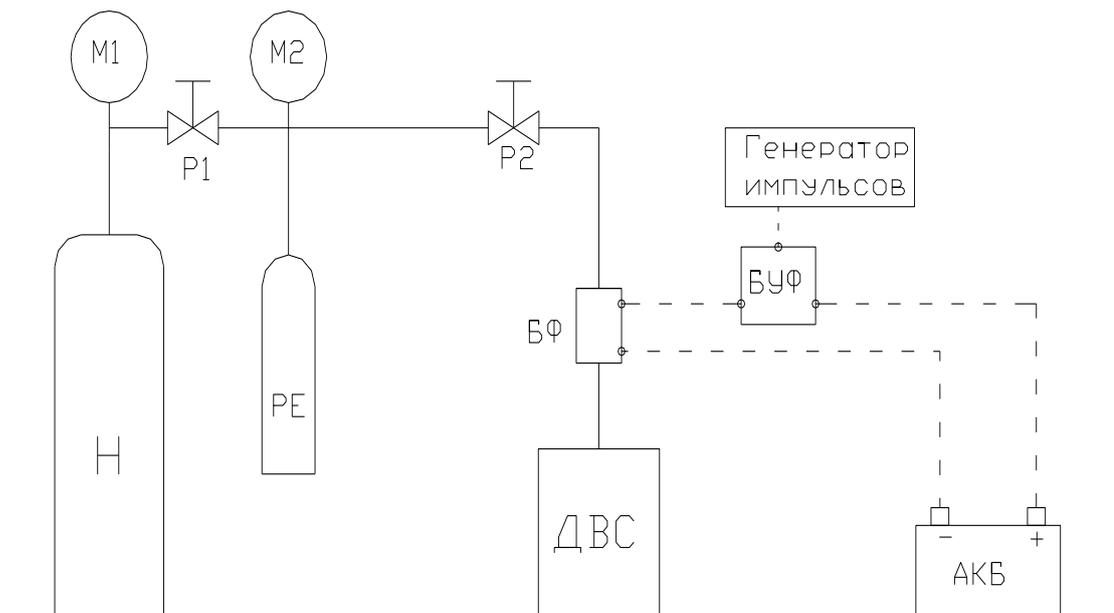
В контексте существующих методик для исследования турбулентного горения, применяются два отличных методологических подхода к анализу предварительно смешанного турбулентного пламени. Первый метод предполагает взгляд на турбулентное пламя как на суперпозицию моментальных сложнопрофильных фронтов реакции, разворачивающихся во времени и создающих картины тонких реакционных зон. Этот мгновенный портрет фронта горения выявляет его сложную структуру, характеризующуюся множеством складков вблизи фронта пламени, что, в конечном счете, воспринимается как обширная зона реакции. Такой

визуально расширенный фронт реакции иногда называется турбулентным фронтом пламени. Распространение этого фронта горения определяется скоростью перемещения его передней границы через несгоревшую смесь. Альтернативный подход представляет собой непосредственно измеряемый в какой-то момент ламинарный фронт реакции в предварительно смешанном пламени, который выглядит тонким и определяется как ламинарное пламя. В контексте плоского турбулентного горения скорость турбулентного расхода указывает на среднюю скорость потока горючей смеси в отношении общей площади сечения пламени. Потребление массы топливно-воздушной смеси обязано соответствовать произведению плотности несгоревшей смеси на скорость ламинарного горения и площадь сжатого турбулентного фронта. Скорость распространения турбулентного фронта горения превышает скорость через среднюю площадь поперечного сечения этого фронта.

2.2 Испытуемый объект и параметры условий испытаний

Испытываемый агрегат представляет собой экспериментальный поршневой двигатель КАМАЗ – 820.52-260 (КАМАЗ – 820.53-260) с четырьмя тактами работы, оснащенный системой искрового зажигания и передовой электронной системой управления. Этот двигатель, имеющий рабочий объем 11,76 литра и степень сжатия 12, разработан с номинальной мощностью 260 кВт, достигаемой при 2200 оборотах коленвала в минуту, и адаптирован для функционирования на сжатом природном газе.ε

К тому же, испытательный стенд двигателя укомплектовывался системой инжекции водорода в топливно-воздушную смесь (ТВС), принцип действия которой демонстрируется на рисунке 21.



Н - баллон с водородом, М1-М2 - манометры, Р1-Р2 - редукторы, БФ – блок форсунок, РЕ - расходная емкость, БУФ - блок управления форсунками, АКБ – аккумуляторная батарея.

Рисунок 21 – Принципиальная схема подачи водорода

Механизм функционирует по такому принципу: водород из контейнера под высоким давлением (Н) доставляется в двигатель через систему снижения давления (редукторы Р1, Р2) и комплекс точно откалиброванных форсунок (БФ), впрыскивающих топливо во впускной тракт сразу после дроссельной заслонки. Регулировка работы форсунок производится через контроллер (БУФ), основанный на применении транзисторного ключа. Для нейтрализации эффектов колебания давления внутри впускного тракта перед системой форсунок обеспечивается стабилизация давления с достижением постоянного перепада в 0,35 мПа, что критично важно для предотвращения нарушения работы системы.

Глава 3 Результаты исследований процесса сгорания альтернативного топлива природного газа с водородом в условиях газодизельного цикла

Параметры регулирования воздушно-топливной смеси были зафиксированы во время функционирования движка на режиме холостого хода и при условиях вращения коленвала на частоте $n = 1500$ об/мин с заданной нагрузкой $P_e = 1,46$ кг/см². Измерения проводились при углах опережения зажигания 0 и 15 градусов относительно угла поворота коленчатого вала.

На рисунке 22 представлены кривые, демонстрирующие вариации в потреблении природного газа G_g , подачи воздуха G_b и объема выхлопных газов $G_{ог}$ в зависимости от коэффициента избытка воздуха (при условии нулевого угла опережения зажигания) в режиме холостого хода двигателя.

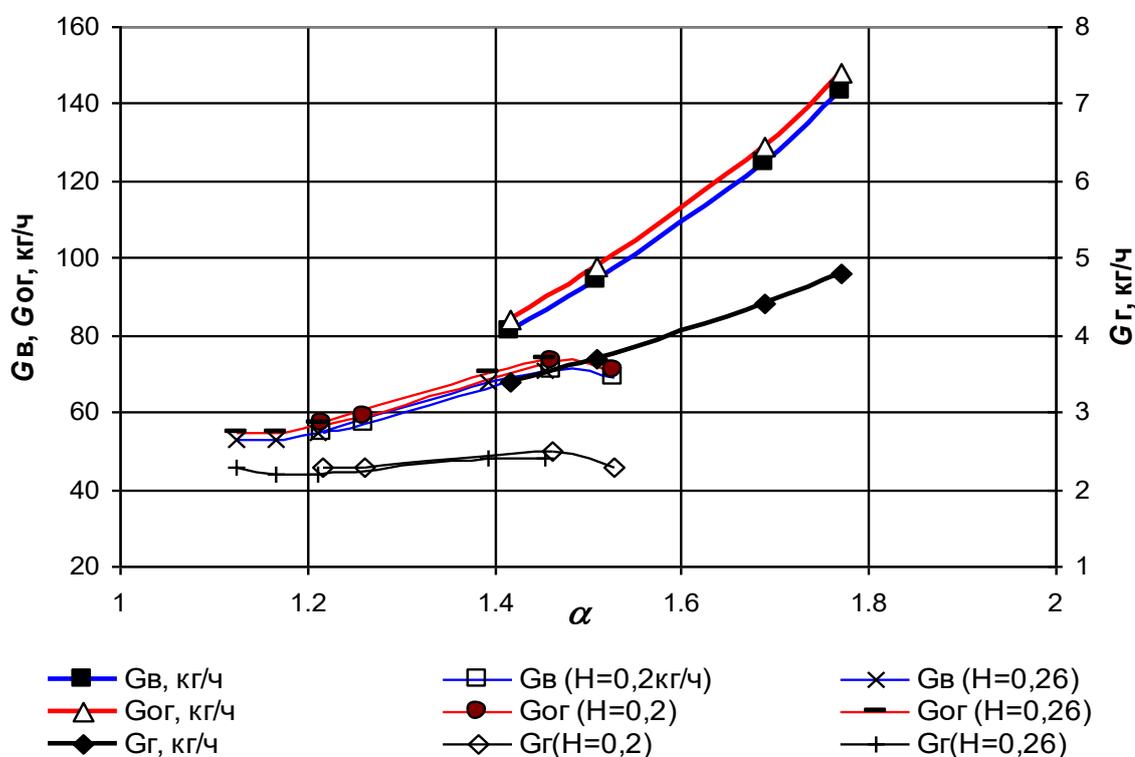


Рисунок 22 – Кривые регулирования по составу топливно-воздушной смеси (частота вращения $n = 800$ об/мин, коэффициент избытка воздуха $P_e = 0$, угол опережения зажигания УОЗ = 0).

Наблюдаемое сокращение потребления воздуха, природного газа (ПГ), и общего количества окислителя при увеличении доли водорода в топливной смеси связано с усилением процесса сгорания. В частности, с добавлением водорода в объёме 0,2-0,26 кг/ч, что представляет собой около 6-8% от общего расхода ПГ, зафиксировано падение его расхода с 3,4 кг/ч до 2,4 кг/ч, или на 29%. Это объясняется улучшенной эффективностью горения благодаря введению водорода, сокращающему необходимость в обновлении горючей смеси для достижения оптимального рабочего состояния двигателя. Кроме того, введение водорода сдвигает рабочие параметры в сторону более обогащенного состава за счёт его собственных горючих качеств, что приводит к уменьшению необходимого количества свежего заряда. В ходе проведённых испытаний целью не было абсолютное совпадение условий экспериментов, учитывая, что точную интерполяцию можно выполнить на основе доступных экспериментальных данных, минуя значительные временные и финансовые траты. Отмечено также, что при других соотношениях экспериментальные показания позволяют оценить снижение расхода ПГ на порядок до 28% при $\alpha = 1,2$, и до 26% при $\alpha = 1,4$, подтверждая закономерность расширения интервала стабильного горения при введении водорода и возможность уменьшения расхода ПГ до достижения предельных условий эффективного сгорания, параметры которого должны быть определены в дальнейших испытаниях.

Рисунок 22 демонстрирует уменьшение общего объема выбросов органических газов. Конкретно, при значениях коэффициента избытка воздуха $= 1,3$ и $= 1,4$, масса выбросов сокращается с 75 до 65 и с 82 до 70 кг/ч, соответственно, что эквивалентно уменьшению на 13 и 14 процентов.

На рисунке 23 представлены зависимости изменения угла открытия дроссельной заслонки от введения водорода в топливную систему. Из данных следует, что водород способствует снижению степени открытия дроссельной заслонки, что при значительных ограничениях может привести к неравномерному изменению скорости вращения коленчатого вала. Это

особенно актуально при достижении минимальных значений, на которые реагирует регулятор холостого хода.

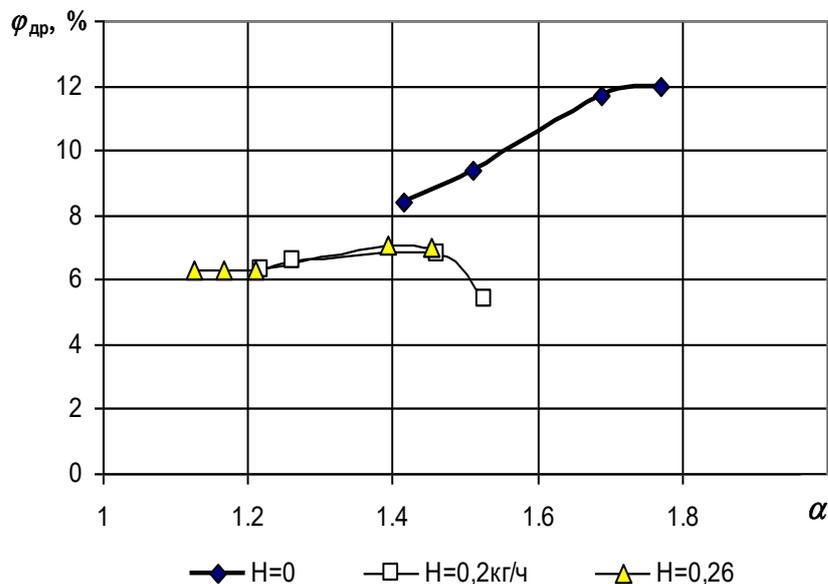


Рисунок 23 – Корректировка положения заслонки воздушного потока при ($n = 800$ об/мин, $Pe = 0$)

На рисунке 24 изображено, что при определенном режиме эксплуатации различия в показателях температур отработанных газов (ОГ) зафиксированных перед турбинными установками в левой и правой колоннах цилиндров являются незначительными. С увеличением концентрации водорода наблюдается заметное падение температур ОГ перед турбинами, например при отношении $\alpha = 1,4$ температура снижается с 430°C до 340°C , что обусловлено изменением характеристики теплообмена за счет улучшения эффективности сгорания присадочного газа и уменьшения общего объема ОГ. При дальнейшем росте α разница в температурах сокращается и при достижении значений $\alpha > 1,5-1,6$ зафиксировано увеличение температурных показателей ОГ.

На рисунке 25 изображена кривая, показывающая зависимость параметров работы двигателя при оборотах равных 1500 в минуту, давлении на выходе равном 1,46 килограмма на квадратный сантиметр и угле опережения зажигания, составляющем 15 градусов по кривой.

Как демонстрируют диаграммы, инжектирование водорода в объемах $H = 0,26$ и $H = 0,44$ кг/ч при эксплуатации двигателя внутреннего сгорания на указанном режиме также ведет к уменьшению потребления топливного газа, воздуха и отходящих газов в общей сложности.

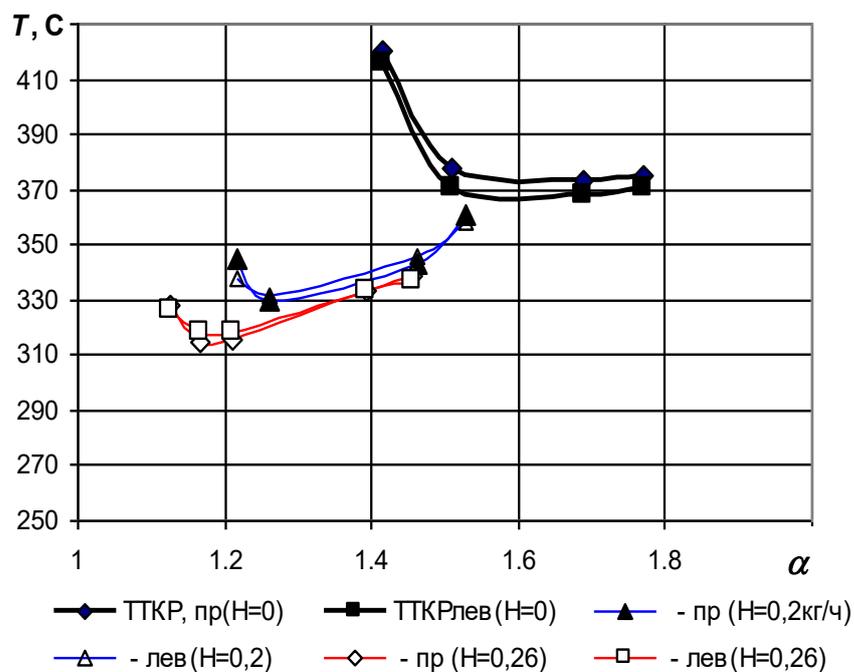


Рисунок 24 – Динамика температуры по мере подачи к турбинным колесам в левой и правой части двигателя на режиме работы 800 оборотов в минуту при нулевом значении внешнего сопротивления ($P_e=0$).

При анализе влияния добавления водорода в топливную смесь на характеристики двигателя внутреннего сгорания выявлено, что уменьшение относительного содержания водорода при переходе от холостого хода к определенному режиму работы ведет к снижению эффективности сокращения расхода природного газа. Конкретные значения показывают, что при обогащении смеси 3% (0,26 кг/ч) водорода экономия топлива достигает 11%, а при увеличении доли водорода до 5% (0,44 кг/ч) – увеличивается до 16%. Это подчеркивает, что введение 3% водорода более эффективно влияет на работу ДВС, чем его последующее увеличение до 5-8%, что связано с насыщением процесса горения активными частицами водорода и их влиянием на улучшение сгорания основного углеводородного топлива.

Результаты различных исследований подтверждают, что оптимальный эффект от добавления водорода наблюдается при его концентрации в пределах 3-6%, когда его каталитическое действие на процесс горения максимально. С дальнейшим ростом доли добавок эффект уменьшается и проявляется преимущественно за счет непосредственной замены объема основного топлива.

Сокращение потребления воздуха и отходящих газов (ОГ) также связано с улучшением эффективности процесса сгорания. К примеру, для общего объема выделяемых ОГ при коэффициенте избытка воздуха ($\alpha = 1,4$), при уровне выбросов $H = 0,26$ кг/ч, наблюдается уменьшение на 4,5%, а при $H = 0,44$ кг/ч отмечается снижение на 9%. Этому сокращению способствует и более закрытое положение дроссельной заслонки по сравнению с режимами работы на природном газе, что подробно иллюстрируется на рисунке 26.

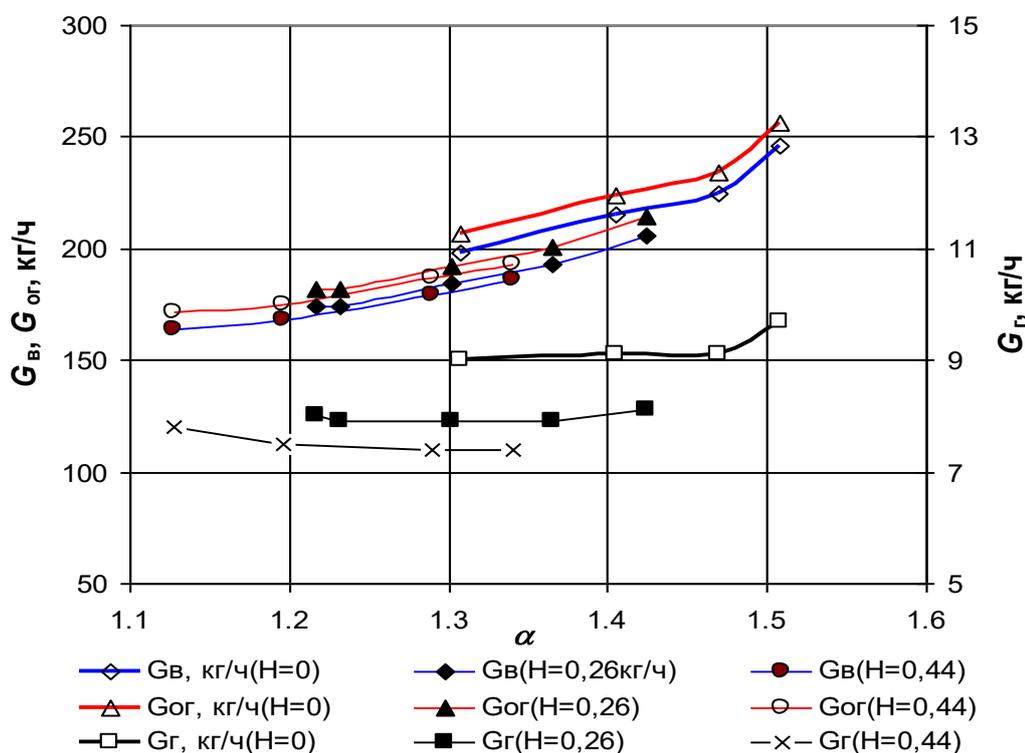


Рисунок 25 – График регулирующего воздействия на состав топливно-воздушной смеси ($n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 15 гр. п.к.в.)

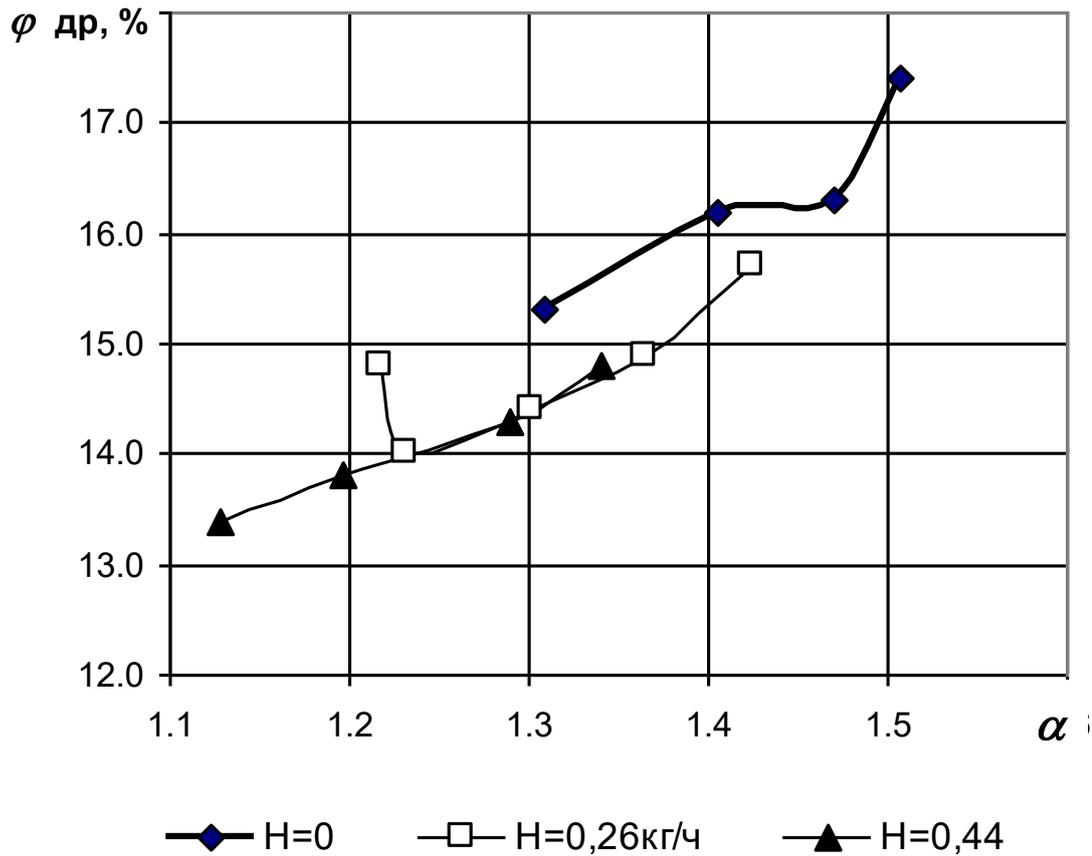


Рисунок 26 – Угол открытия дроссельной заслонки в условиях обогащения топливной смеси водородом ($n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 15 гр. п.к.в.).

Глава 4 Обзор результатов моделирования влияния альтернативных топлив на характеристики ДВС

4.1 Анализ результатов моделирования при работе на бензине

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

На рисунке 27 представлены эффективные параметры двигателя.

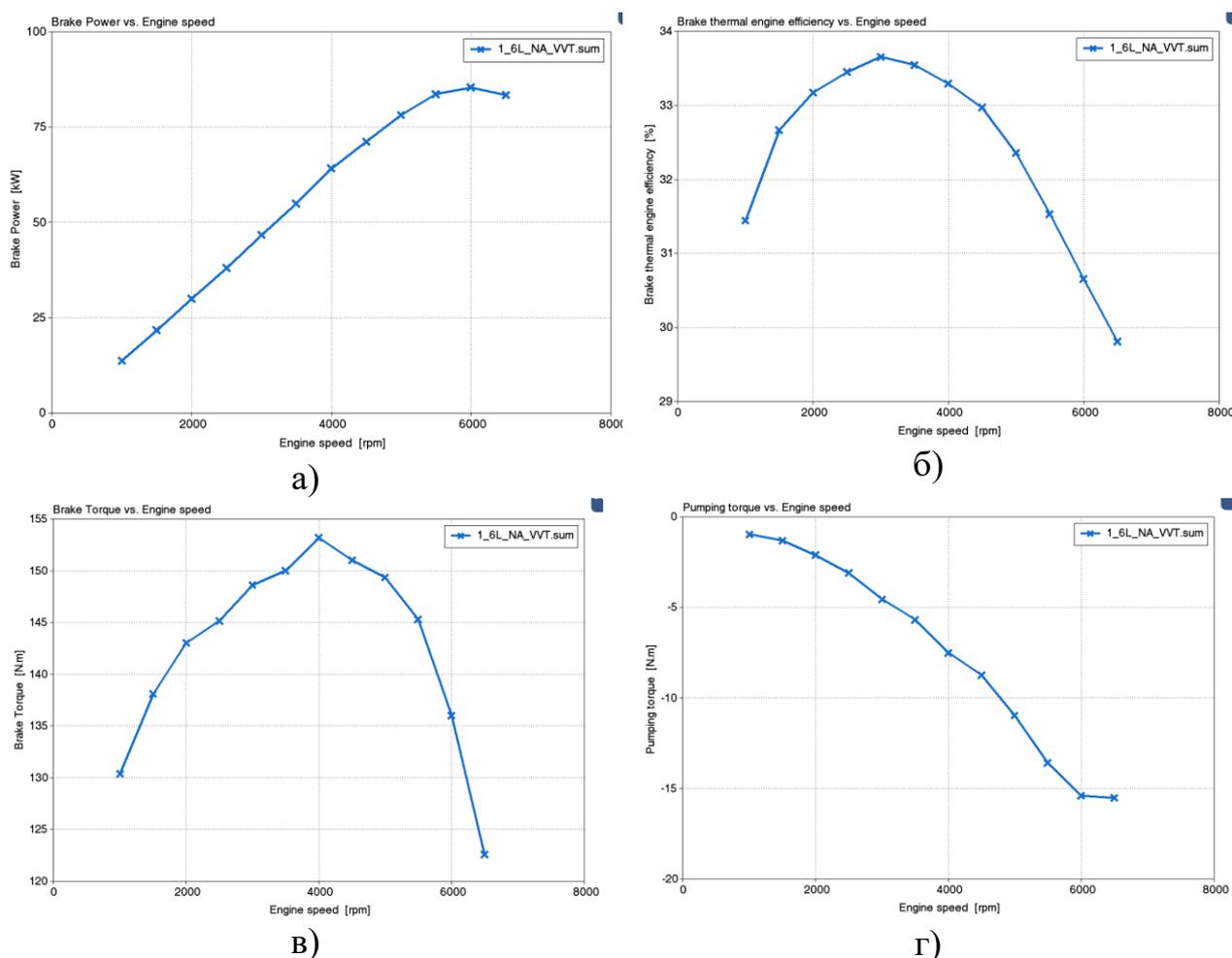
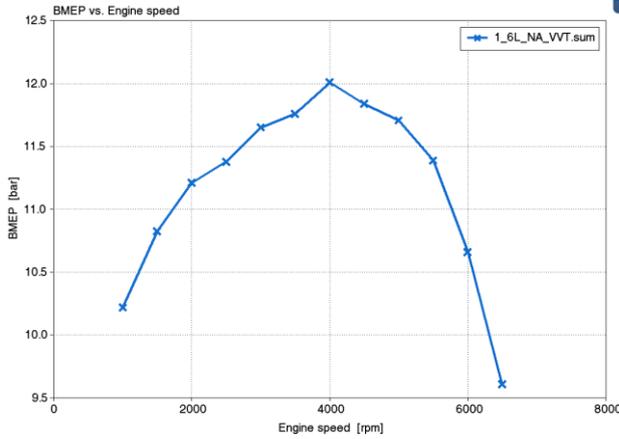
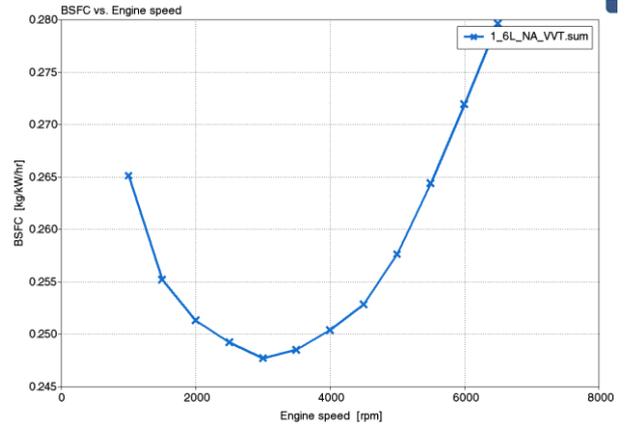


Рисунок 27 – Основные эффективные параметры двигателя: а) эффективная мощность; б) эффективный КПД; в) крутящий момент; г) насосные потери крутящего момента

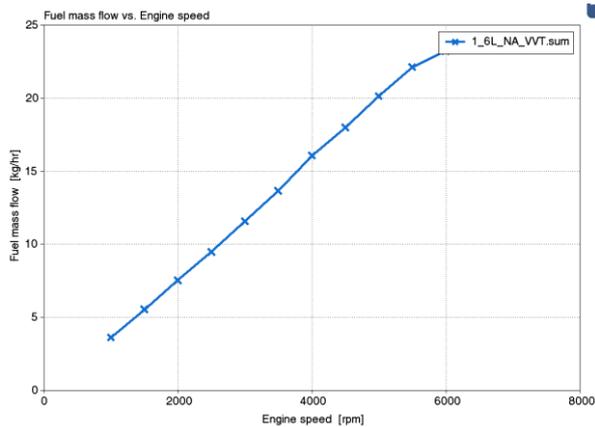
На рисунке 28 представлены осредненные эффективны параметры, характеризующие рабочий процесс двигателя.



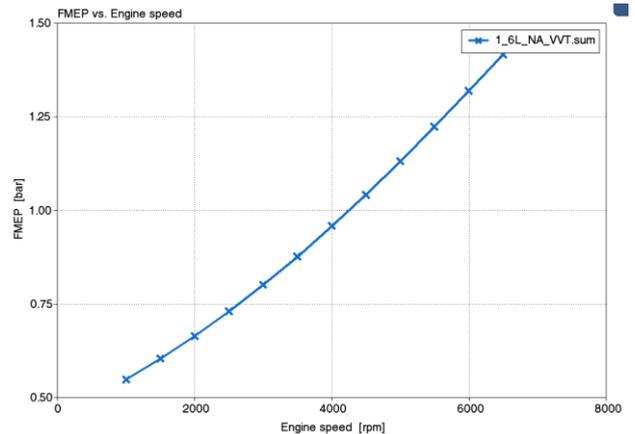
а)



б)



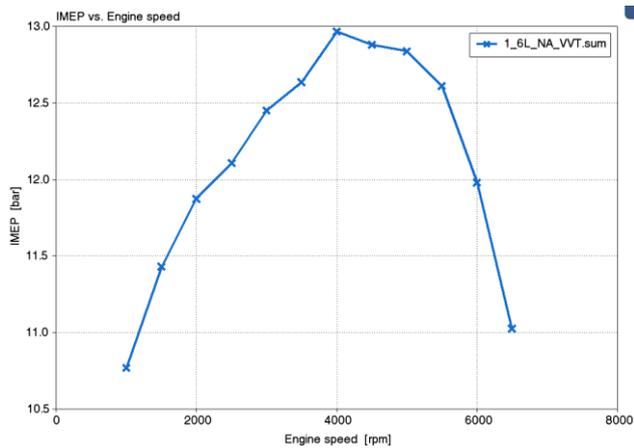
в)



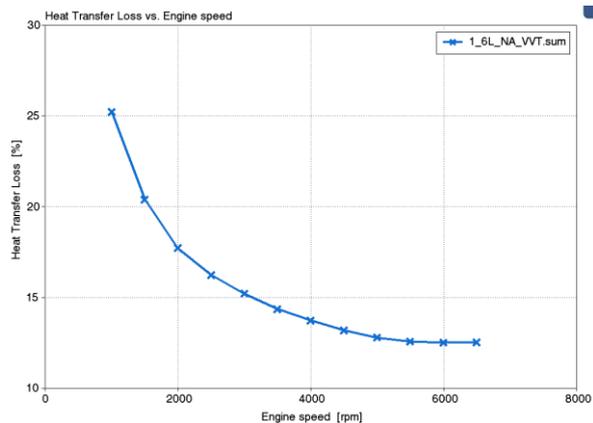
г)

Рисунок 28 – 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

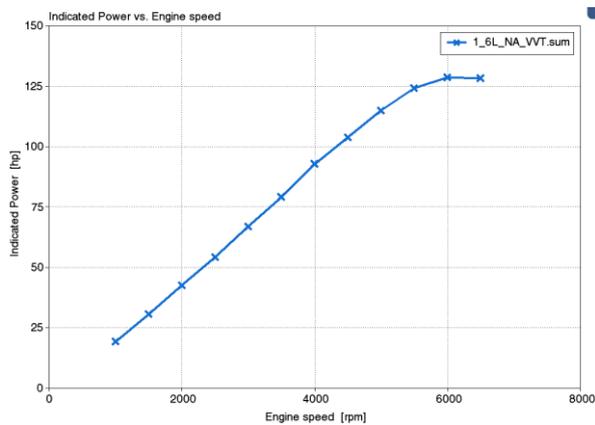
На рисунке 29 представлены индикаторные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



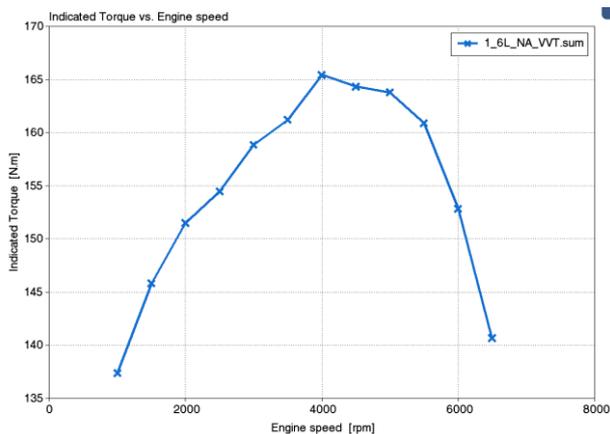
а)



б)



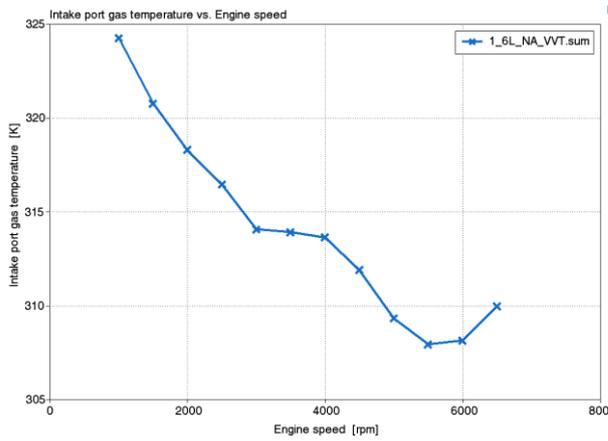
в)



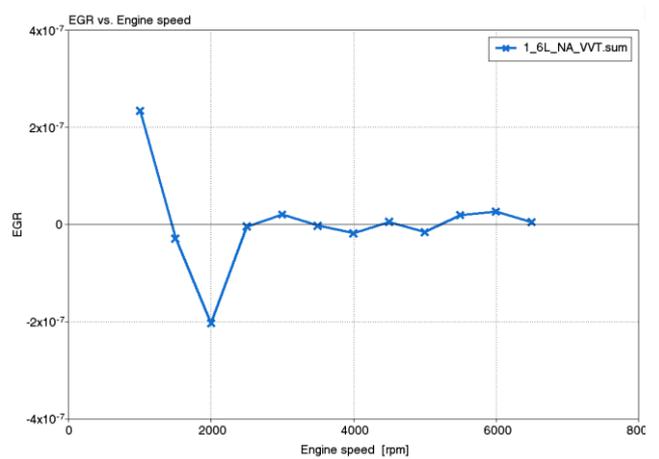
г)

Рисунок 29 – Основные индикаторные параметры двигателя: а) среднее индикаторное давление; б) доля потерь тепла в стенку в %; в) индикаторная мощность; г) индикаторный крутящий момент

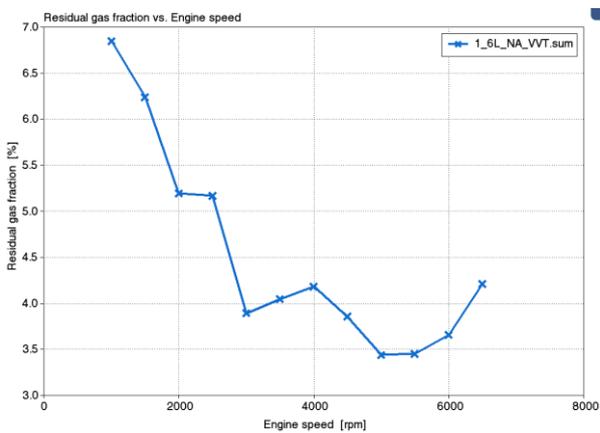
На рисунке 30 представлены основные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



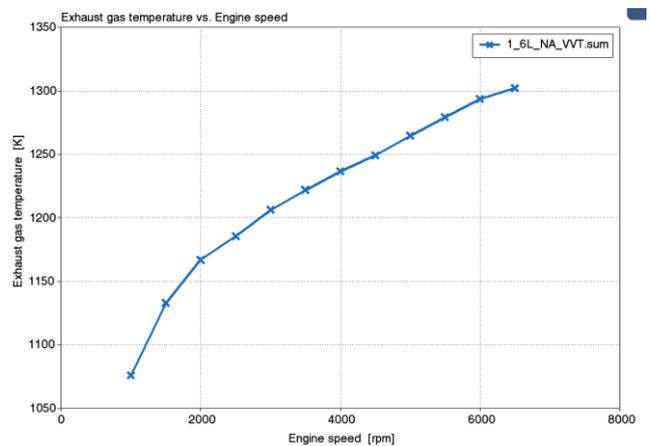
а)



б)



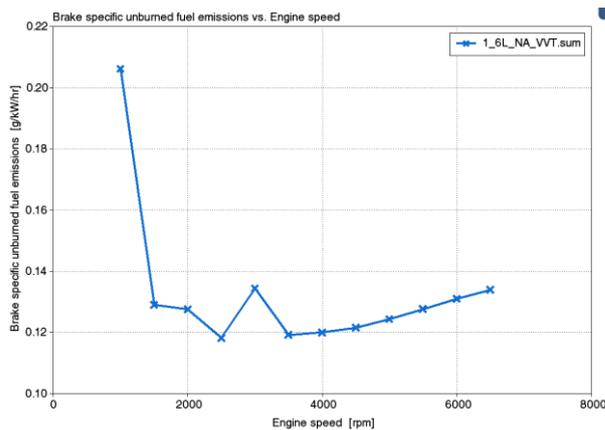
в)



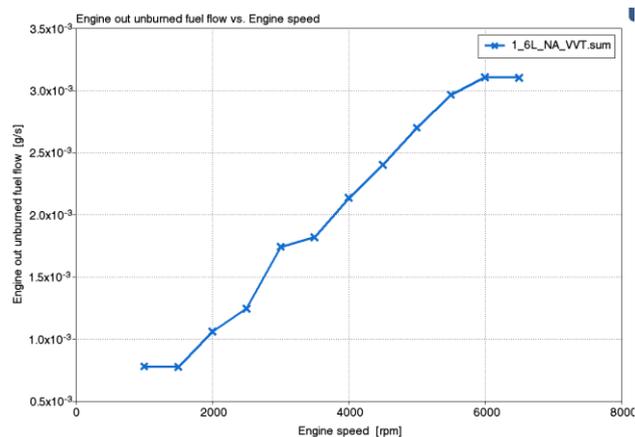
г)

Рисунок 30 – Основные параметры двигателя: а) температура воздуха на впуске; б) коэффициент перепуска отработавших газов; в) коэффициент остаточных газов; г) температура остаточных газов

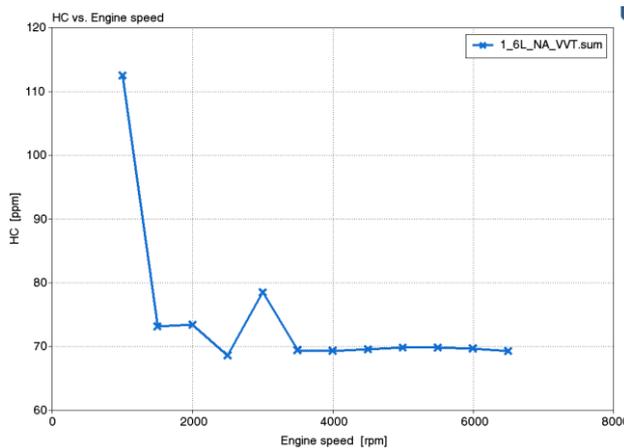
На рисунке 31 представлены основные параметры токсичности по несгоревшим углеводородам, характеризующие рабочий процесс двигателя и полноту сгорания топлива.



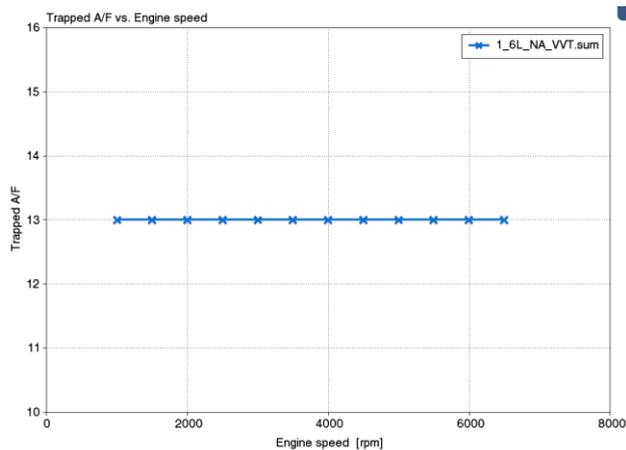
а)



б)



в)



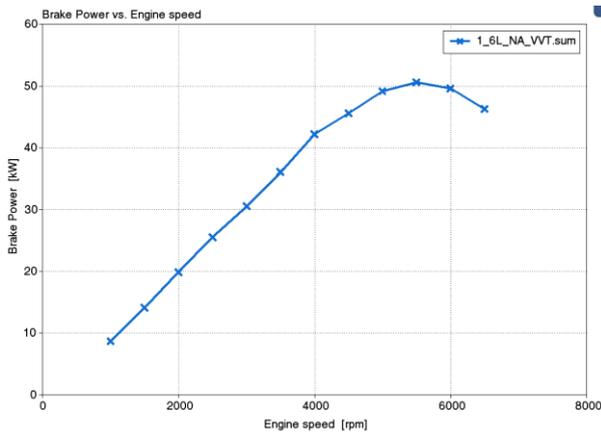
г)

Рисунок 31 – 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

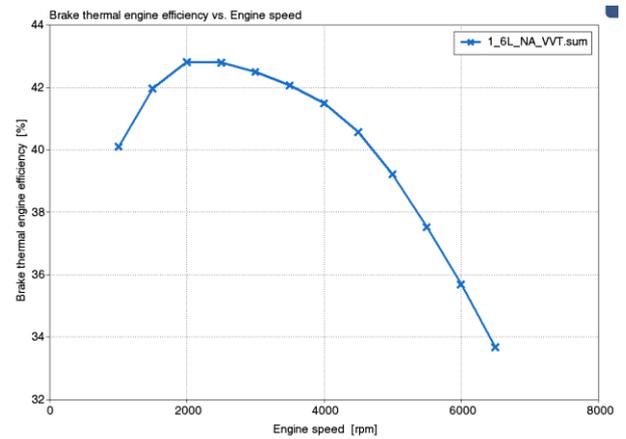
4.2 Анализ результатов моделирования при работе на метаноле

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

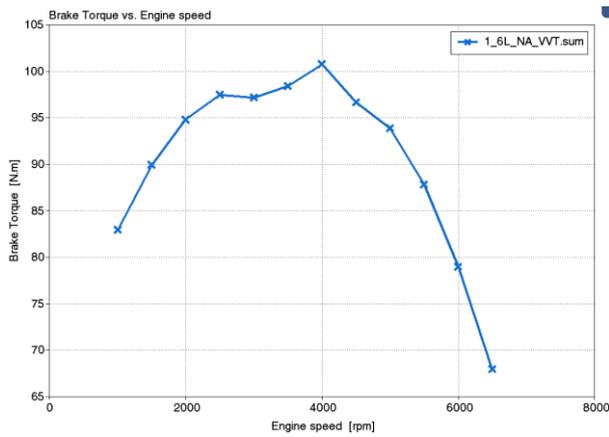
На рисунке 32 представлены эффективные параметры двигателя.



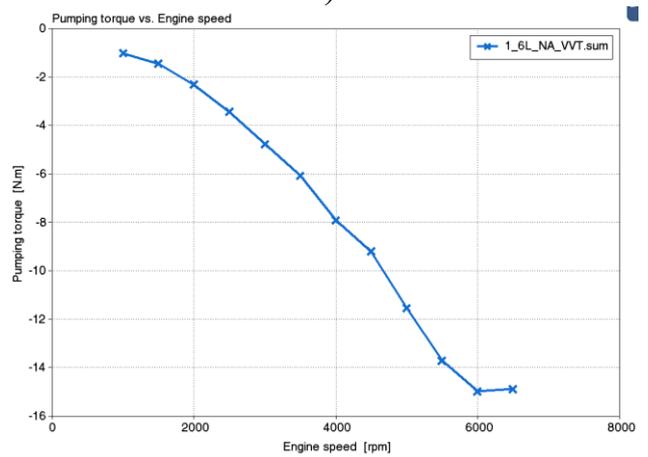
а)



б)



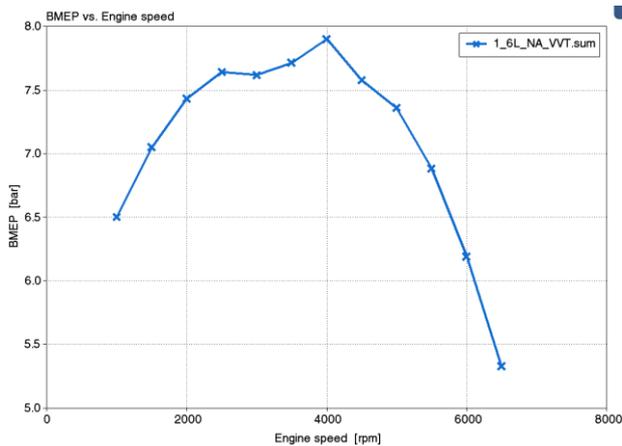
в)



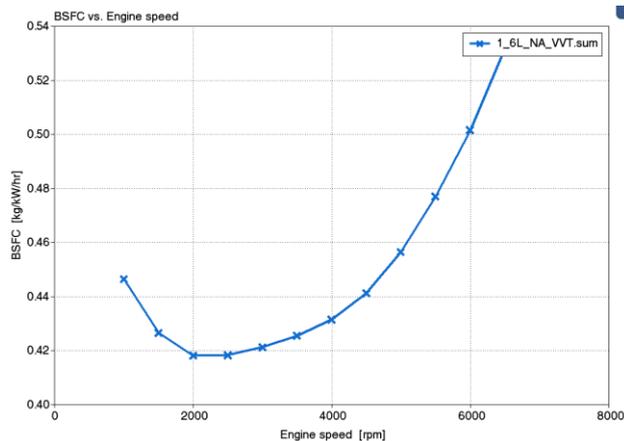
г)

Рисунок 32 – Основные эффективные параметры двигателя: а) эффективная мощность; б) эффективный КПД; в) крутящий момент; г) насосные потери крутящего момента

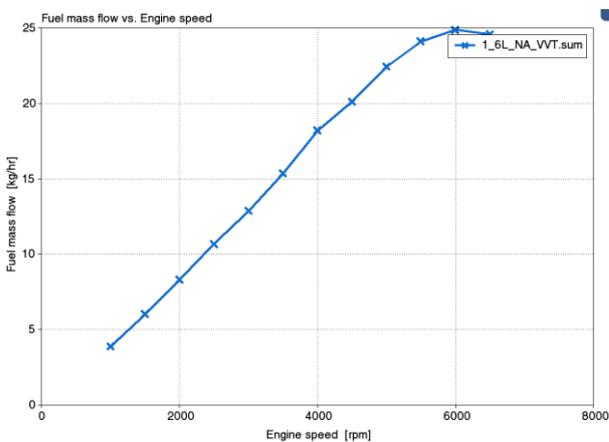
На рисунке 33 представлены осредненные эффективны параметры, характеризующие рабочий процесс двигателя.



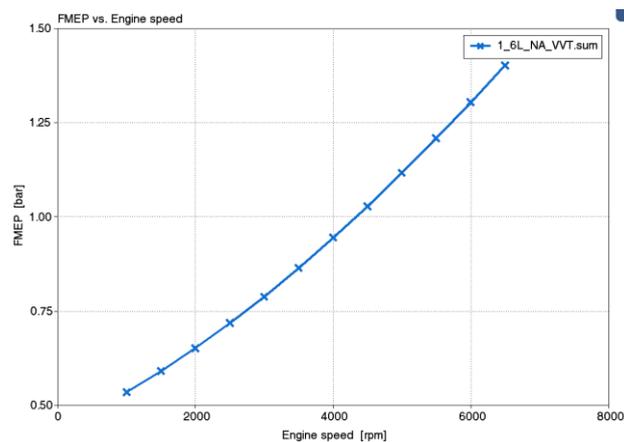
а)



б)



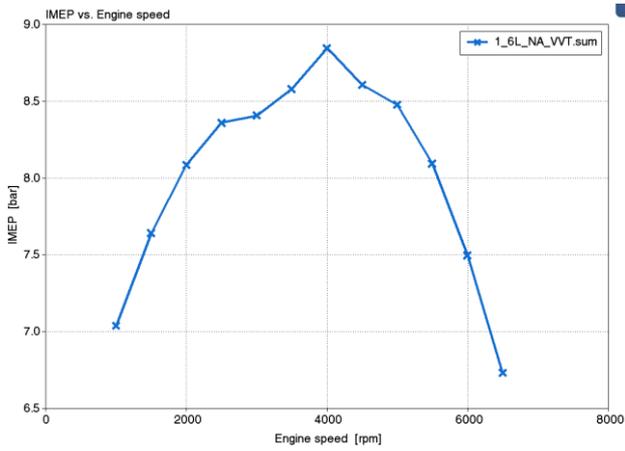
в)



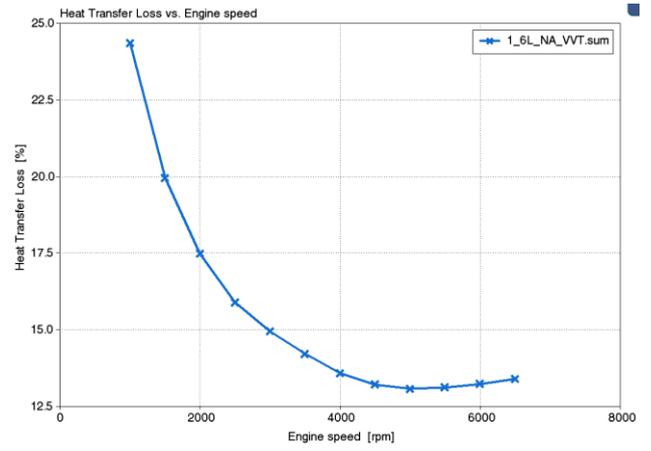
г)

Рисунок 33 – 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

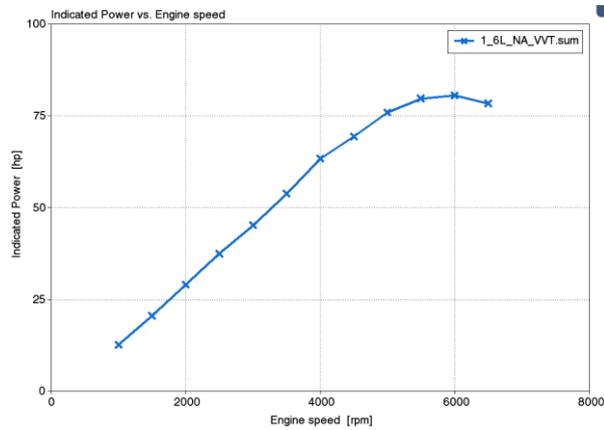
На рисунке 34 представлены индикаторные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



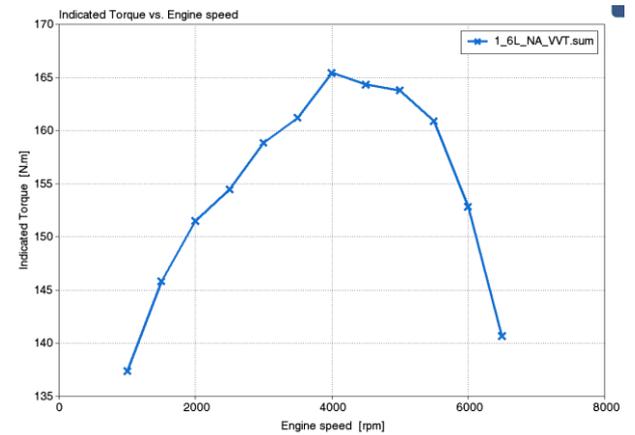
а)



б)



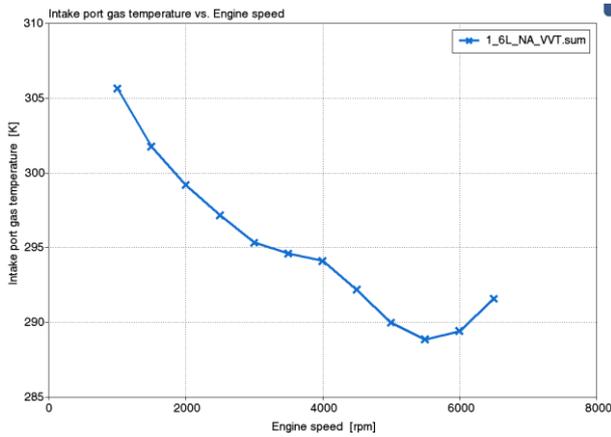
в)



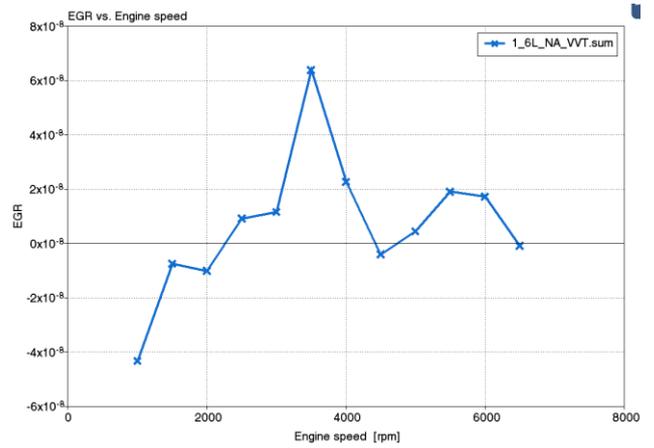
г)

Рисунок 34 – Основные индикаторные параметры двигателя: а) среднее индикаторное давление; б) доля потерь тепла в стенку в %; в) индикаторная мощность; г) индикаторный крутящий момент

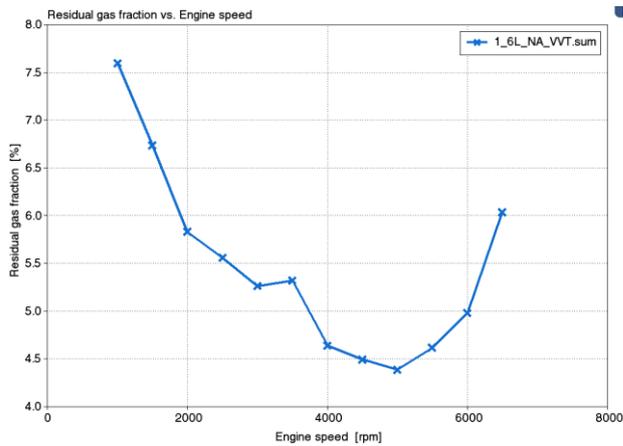
На рисунке 35 представлены основные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



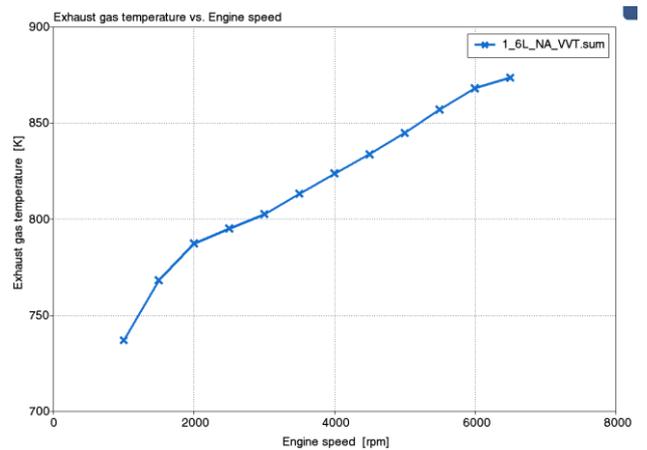
а)



б)



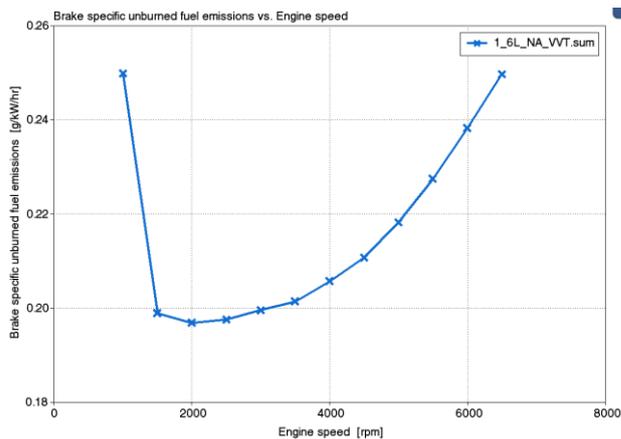
в)



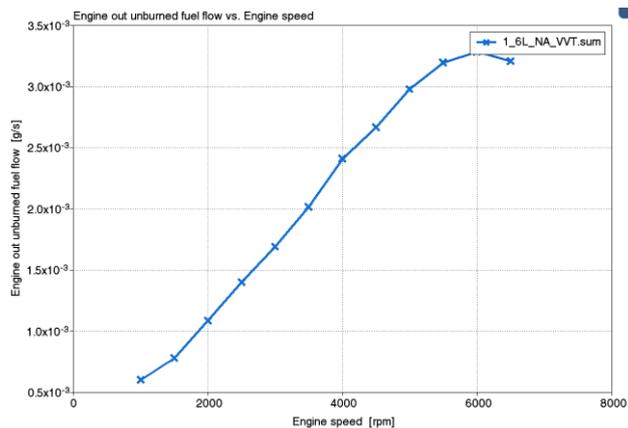
г)

Рисунок 35 – Основные параметры двигателя: а) температура воздуха на впуске; б) коэффициент перепуска отработавших газов; в) коэффициент остаточных газов; г) температура остаточных газов

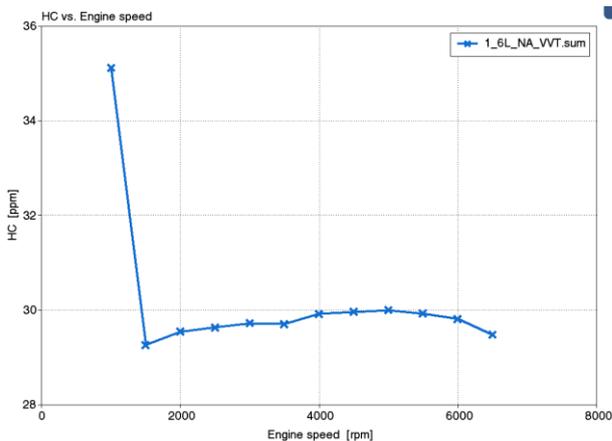
На рисунке 36 представлены основные параметры токсичности по несгоревшим углеводородам, характеризующие рабочий процесс двигателя и полноту сгорания топлива.



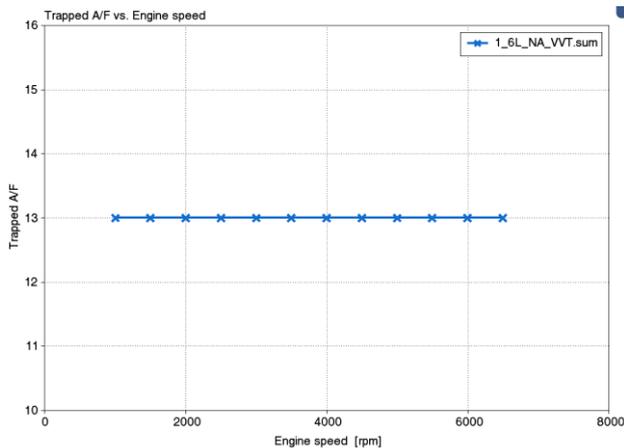
а)



б)



в)



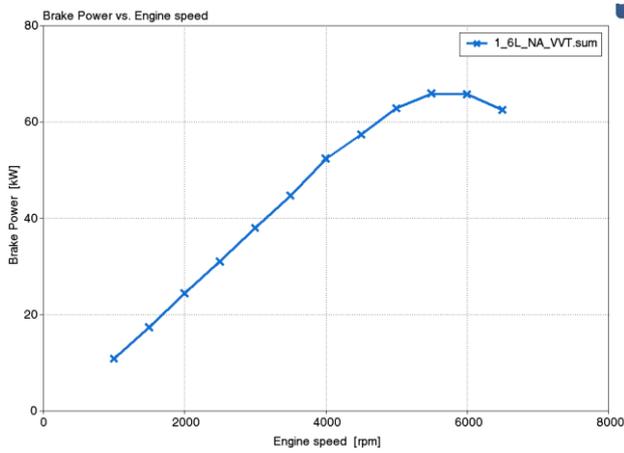
г)

Рисунок 36 – 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

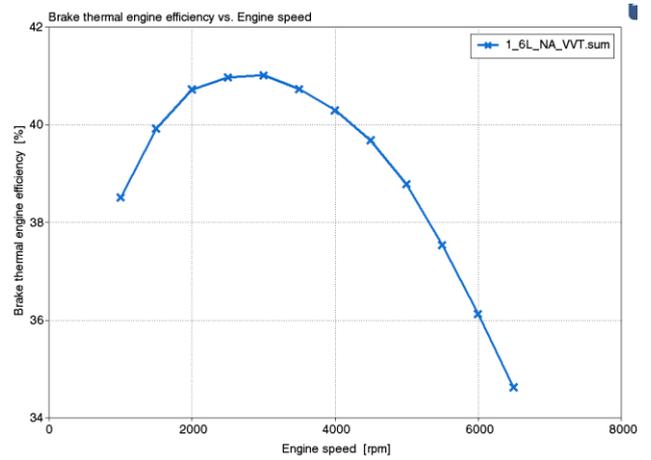
4.3 Анализ результатов моделирования при работе на этаноле

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

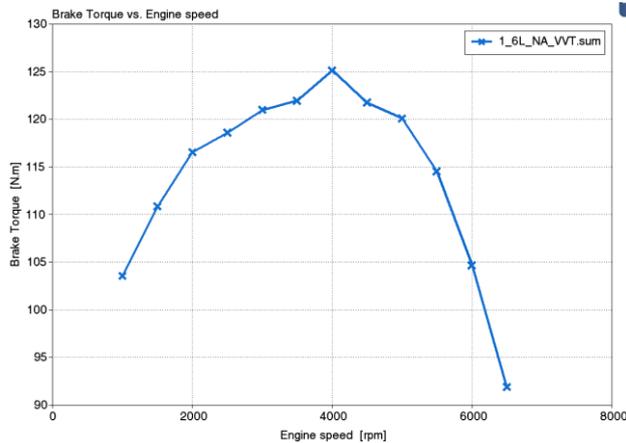
На рисунке 37 представлены эффективные параметры двигателя.



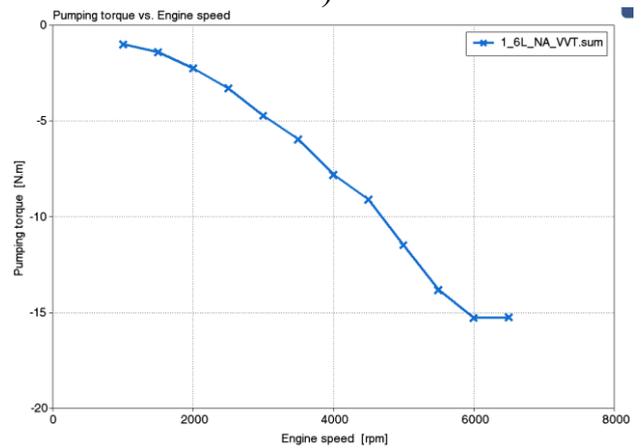
а)



б)



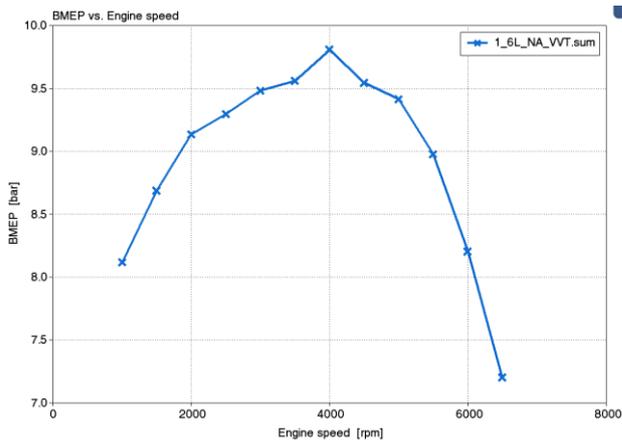
в)



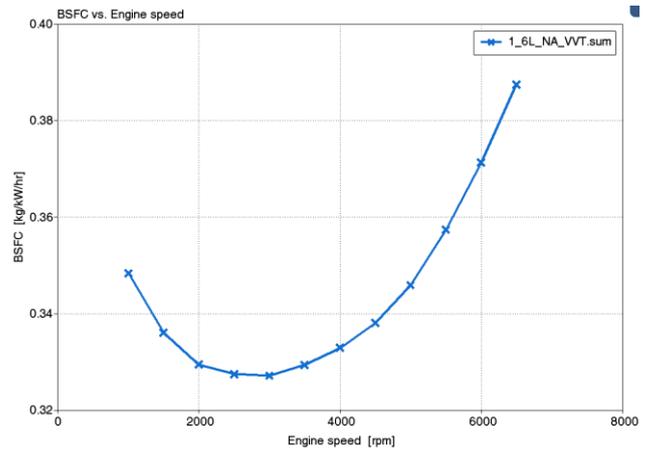
г)

Рисунок 37 – Основные эффективные параметры двигателя: а) эффективная мощность; б) эффективный КПД; в) крутящий момент; г) насосные потери крутящего момента

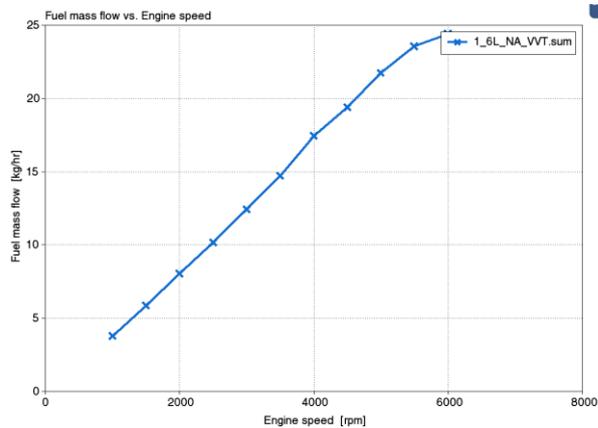
На рисунке 38 представлены осредненные эффективны параметры, характеризующие рабочий процесс двигателя.



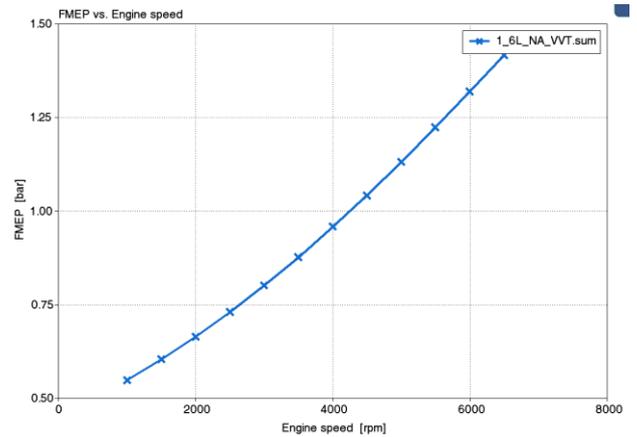
а)



б)



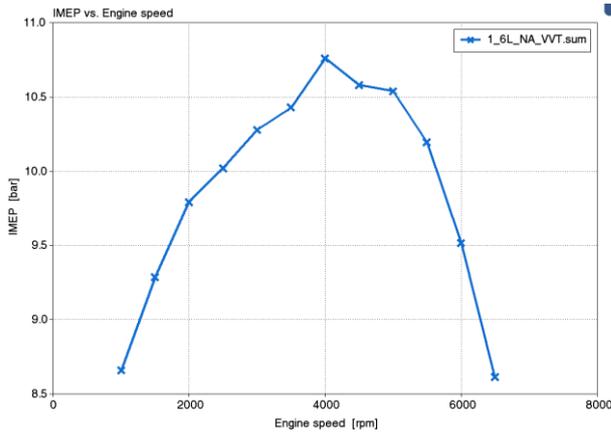
в)



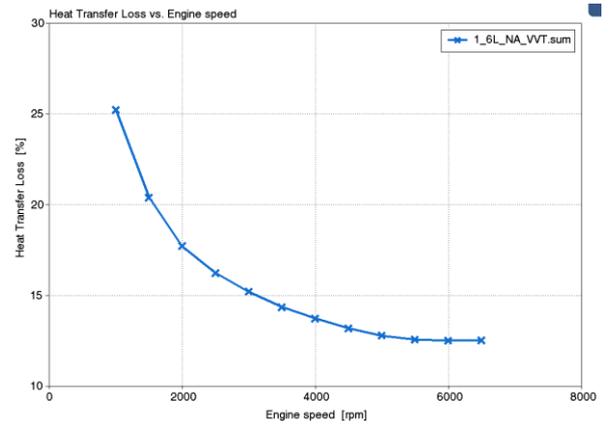
г)

Рисунок 38 – 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

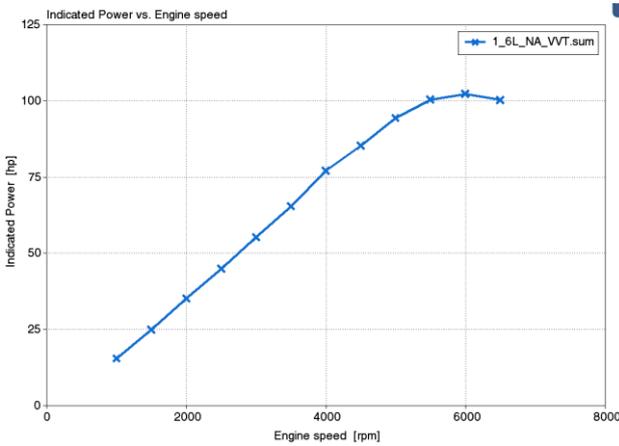
На рисунке 39 представлены индикаторные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



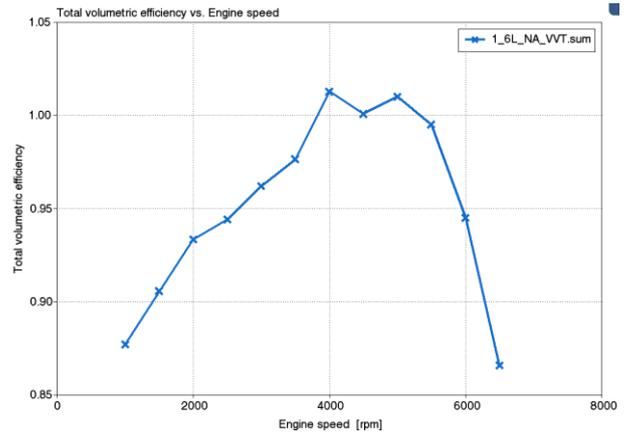
а)



б)



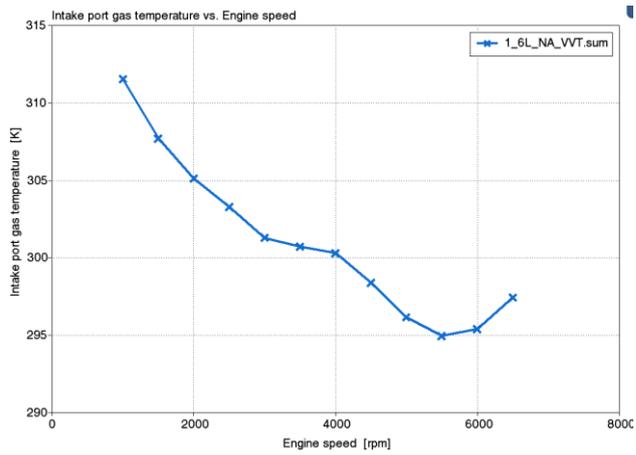
в)



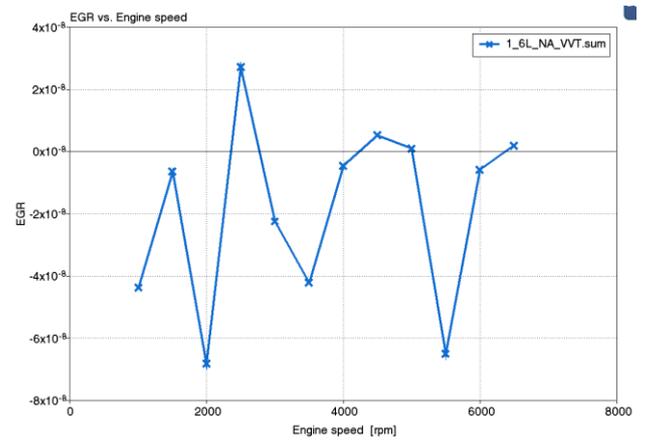
г)

Рисунок 39 – Основные индикаторные параметры двигателя: а) среднее индикаторное давление; б) доля потерь тепла в стенку в %; в) индикаторная мощность; г) коэффициент наполнения

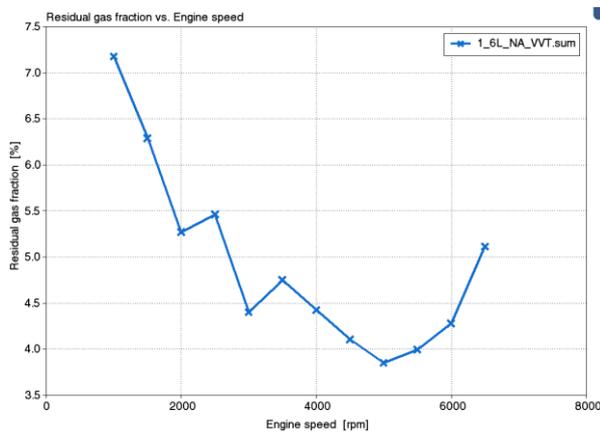
На рисунке 40 представлены основные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



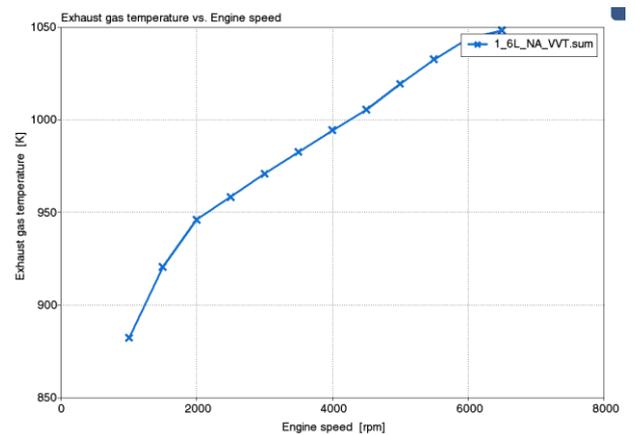
а)



б)



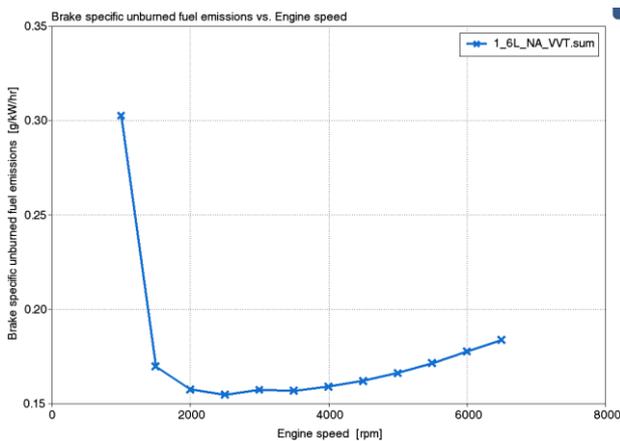
в)



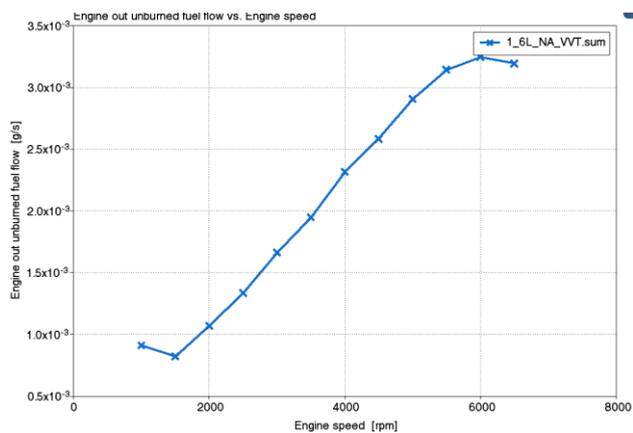
г)

Рисунок 40 – Основные параметры двигателя: а) температура воздуха на впуске; б) коэффициент перепуска отработавших газов; в) коэффициент остаточных газов; г) температура остаточных газов

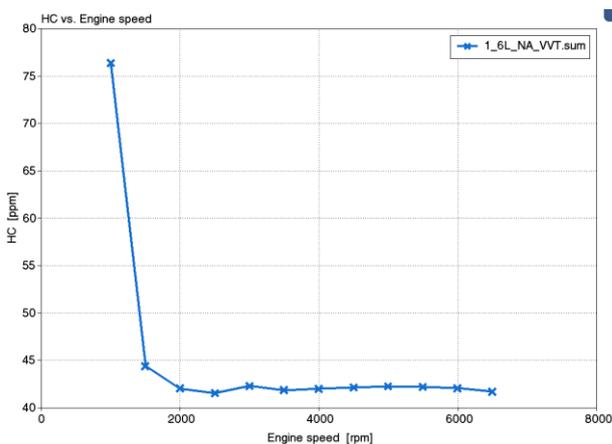
На рисунке 41 представлены основные параметры токсичности по несгоревшим углеводородам, характеризующие рабочий процесс двигателя и полноту сгорания топлива.



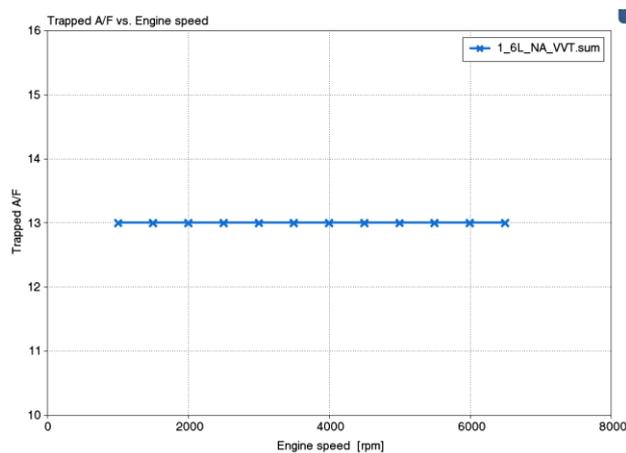
а)



б)



в)



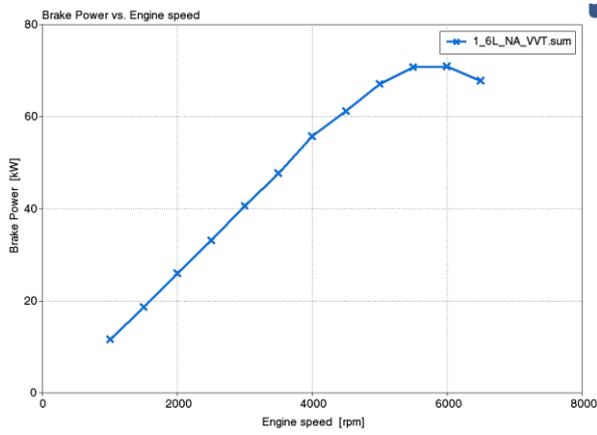
г)

Рисунок 41 – 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

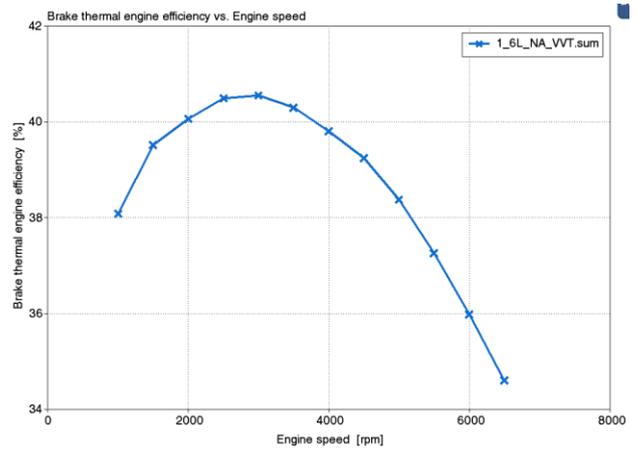
4.4 Анализ результатов моделирования при работе на E85

Результаты моделирования четырехцилиндрового атмосферного двигателя на жидком топливе при работе на E85 (смеси 85 этанола и 15 бензина по массе) в форме таблицы из программы WAVE Ricardo 19.1 представлены в приложении Г. На рисунках ниже будут приведены скоростные характеристики по основным параметрам работы двигателя.

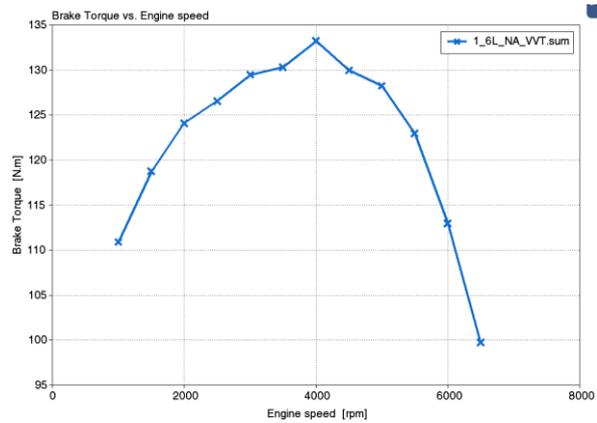
На рисунке 42 представлены эффективные параметры двигателя.



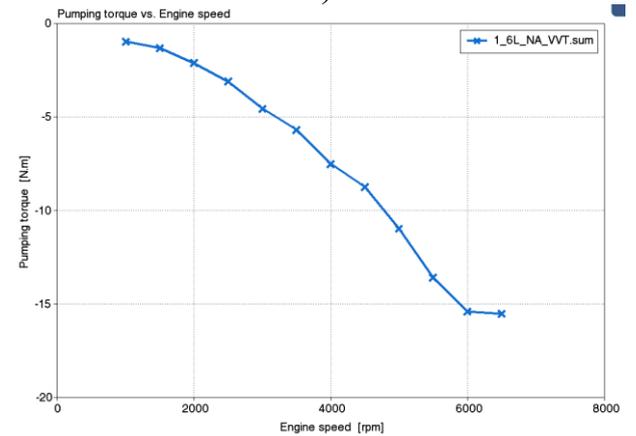
а)



б)



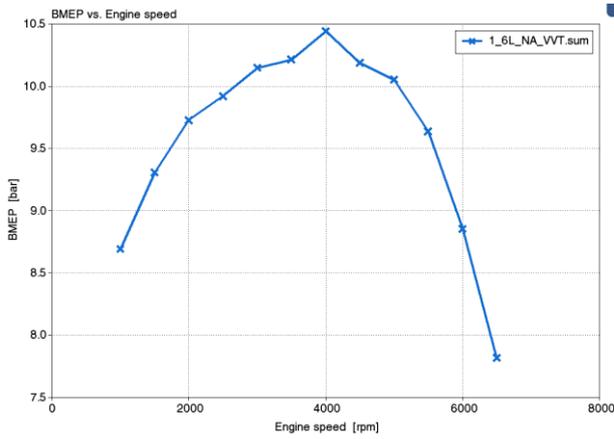
в)



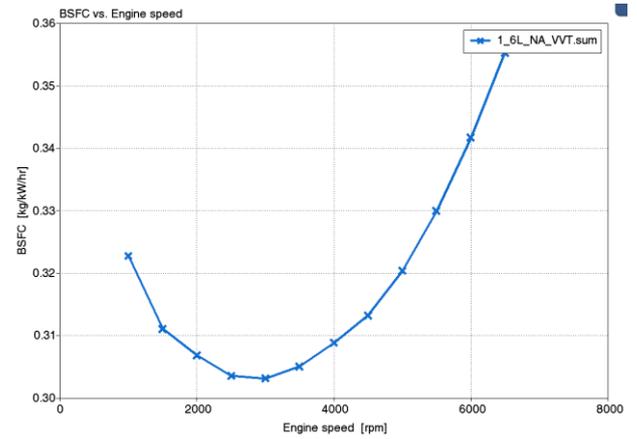
г)

Рисунок 42 – Основные эффективные параметры двигателя: а) эффективная мощность; б) эффективный КПД; в) крутящий момент; г) насосные потери крутящего момента

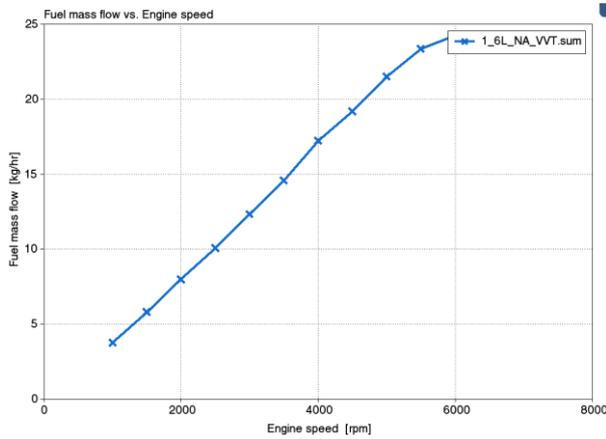
На рисунке 43 представлены осредненные эффективны параметры, характеризующие рабочий процесс двигателя.



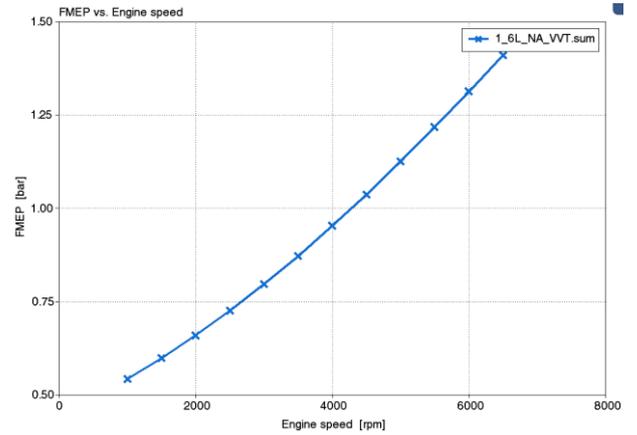
а)



б)



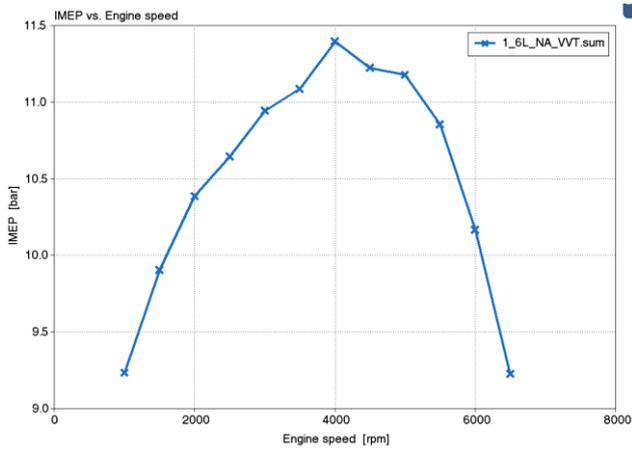
в)



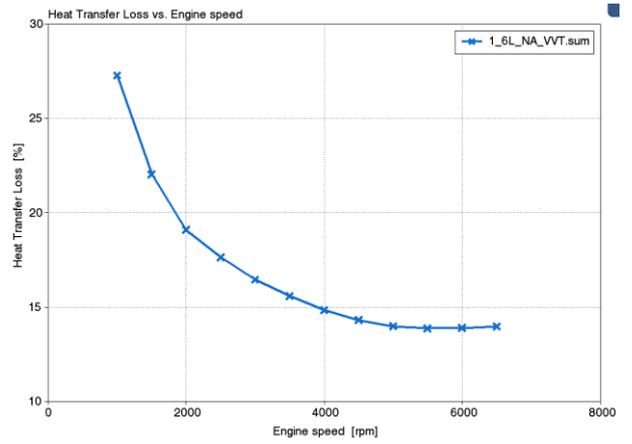
г)

Рисунок 43 – 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

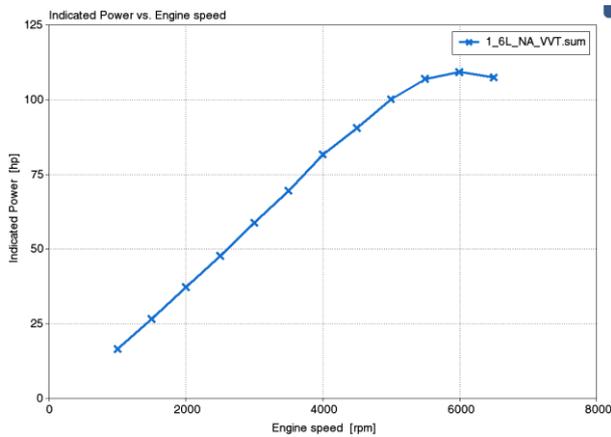
На рисунке 44 представлены индикаторные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



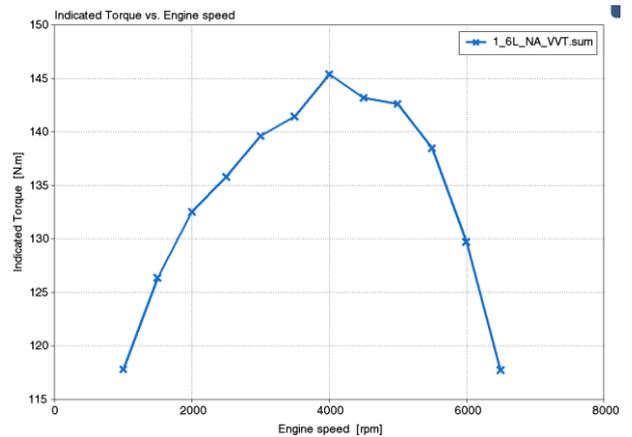
а)



б)



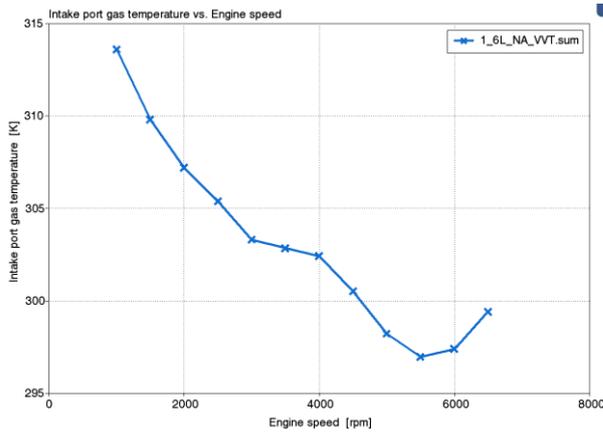
в)



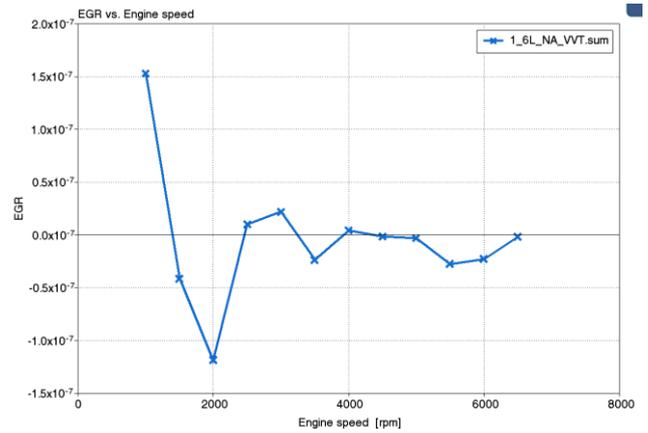
г)

Рисунок 44 – Основные индикаторные параметры двигателя: а) среднее индикаторное давление; б) доля потерь тепла в стенку в %; в) индикаторная мощность; г) индикаторный крутящий момент

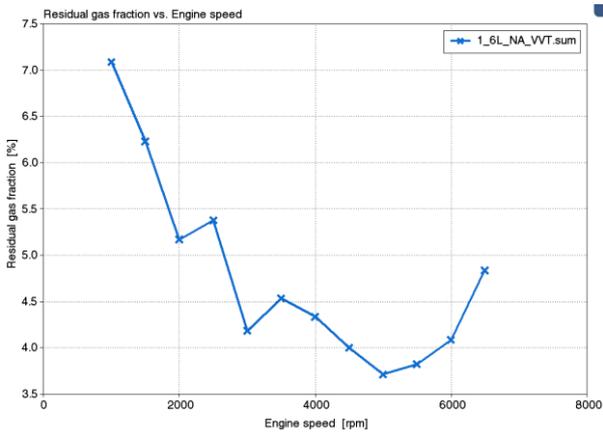
На рисунке 45 представлены основные параметры двигателя, характеризующие рабочий процесс двигателя.



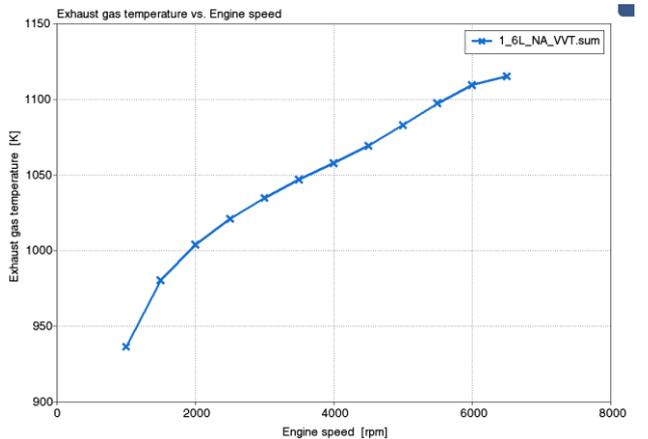
а)



б)



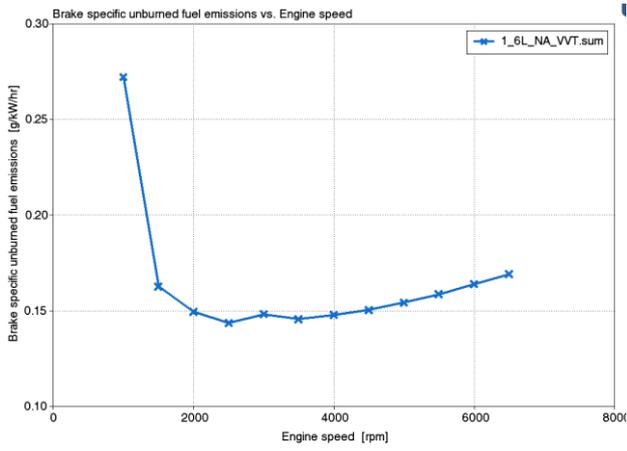
в)



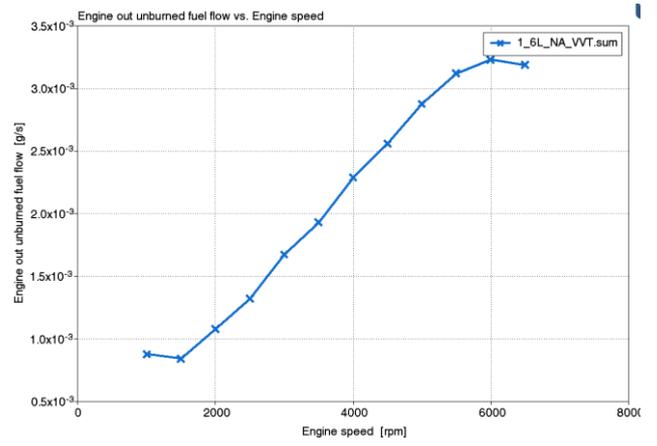
г)

Рисунок 45 – Основные параметры двигателя: а) температура воздуха на впуске; б) коэффициент перепуска отработавших газов; в) коэффициент остаточных газов; г) температура остаточных газов

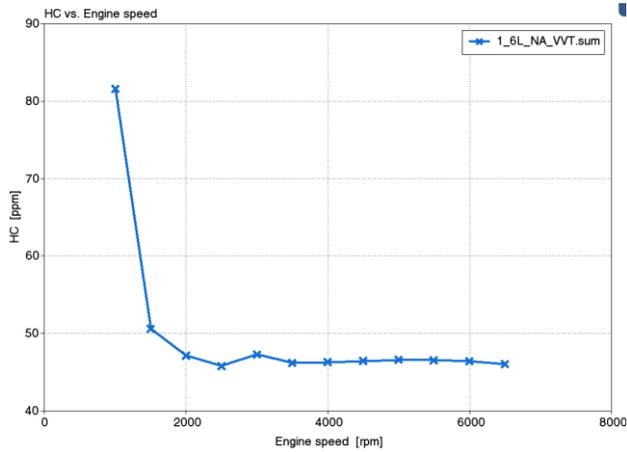
На рисунке 46 представлены основные параметры токсичности по несгоревшим углеводородам, характеризующие рабочий процесс двигателя и полноту сгорания топлива.



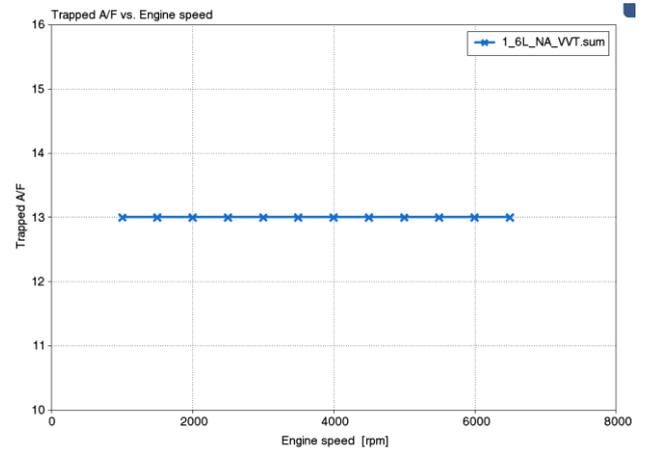
а)



б)



в)



г)

Рисунок 46 – 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

Выполнен анализ альтернативных топлив в современных энергетических установках. Получены следующие основные выводы, а именно:

1. Применение природного газа становится значительно эффективнее если добавлять от 2 до 5% от массы в него водорода, это обеспечит снижение токсичности почти на 10% и повысит эффективность сгорания особенно на малых нагрузках, при ухудшении горючих свойств рабочей смеси.
2. Применение жидких альтернативных топлив имеет больше проблем связанных с особенностями эксплуатации. По результатам моделирования и обзора литературы получается, что наиболее эффективным является применение смесевых топлив, таких как E85 (85 % этанола и 15 % бензина) или M65 (65% метанола и 35% бензина), что приводит к стабилизации условий горения на бедных смесях и при низких температурах. Применение чистых спиртовых топлив осложнено большими нагрузками на топливную аппаратуру, высокими коррозионными свойствами, сложностями холодного запуска.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Anselm Eisentraut, et al., “Technology Roadmap Biofuels for Transport,” International Energy Agency, Paris, France, 2011.
2. Luis Serrano, et al., “Autogas in Europe, the Sustainable Alternative, an LPG Industry Roadmap,” AEGPL, Belgium, 2013.
3. Laurencas Raslavicius. “Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 32, Pages 513–525, 2013.
4. Mistry C. S. “Comparative assessment on performance of multi cylinder engine using CNG, LPG and Petrol as a fuel,” Society of Automotive Engineers technical paper series, 2005.
5. Vivian Leung, “Slow diffusion of LPG vehicles in China—Lessons from Shanghai, Guangzhou and Hong Kong,” Energy Policy, Volume 39, Issue 6, June 2011, Pages 3720-373, 2011.
6. H.E. Saleh, “Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine,” Fuel, Vol. 87, Issues 13–14, Pages 3031–3039, 2008.
7. Mockus S., “The influence of gaseous fuel on the characteristics of car engines,” 2007.
8. Jacob Spendelow, Jason Marcinkoski. “Fuel Cell System Cost,” US Energy Department, 2013.
9. Mikhail Granovskii, et al., “Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 31, Issue 3, Pages 337–352, 2006.
10. Stephan Ramesohl, “Energy system aspects of hydrogen as an alternative fuel in transport,” Energy Policy, Vol. 34, Issue 11, Pages 1251–1259, 2005
11. Bettina Kampman, et al., “Bringing biofuels on the market, Options to increase EU biofuels volumes beyond the current blending limits,” CE Delft, Netherlands, 2013.

12. Venkat Krishnan, et al., "A planning model to assess hydrogen as an alternative fuel for national light-duty vehicle portfolio," *Energy*, Vol. 73, Pages 943–957, 2014.
13. Larminie J, Dicks. A., *Fuel cell systems explained*. 2nd ed. Chichester, England: Wiley, 2003.
14. Winther M, Møller F., "Emission consequences of introducing bio ethanol as a fuel for gasoline cars. Atmospheric Environment," *Atmospheric Environment*, Vol. 55, 2012, Pages 144-153, 2012.
15. Schumacher LG, "Heavy-duty engine exhaust emission tests using methyl ester. soybean oil/diesel fuel blends" *Bioresource Technology - Bioresource Technol* , Vol. 57, no. 1, Pages 31-36, 1996.
16. Reijnders L, "Conditions for the sustainability of biomass based fuel use," *Energy Policy*, Volume 34, Issue 7, Pages 863–876, 2006.
17. Adam Brown, et al., "Renewable energy markets and prospects by technology," International Energy Agency, Paris, France, 2011.
18. Andrew Papson, et al., "Compressed Air Vehicles Drive-Cycle Analysis of Vehicle Performance, Environmental Impacts, and Economic Costs." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Issue 2191, pages 77, 2010
19. A.A.Keste, et al., *Vehicle Operating on Compressed Air by Inversion of Slider Crank Mechanism*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, ISSN (e): 2278- 1684, Pages 50-54, 2012
20. Li Hai, "Heat transfer model applicable to the refuelling process for natural gas vehicles," Master thesis, Victoria University of Technology, 1993.
21. Michiel Nijboer, "The contribution of natural gas vehicles to sustainable transport," International Energy Agency, Paris, France, 2010.
22. Achtnicht, M., et al., "The impact of fuel availability on demand for alternative-fuel vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 17, Issue 3, Pages 262-269, 2012.

23. Pierpaolo Cazzola, et al., “Energy Technology Perspectives,” International Energy Agency, Paris, France, 2014.
24. Peter Harrop and Raghu Das, “Materials vulnerable to price hikes,” Car Traction Batteries - the New Gold Rush 2010-2020, IDTechEx, 2010.
25. J. Van Mierlo, et al., “Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery hybrid and fuel cell vehicles,” Energy Conversion and Management, Volume 47, Issue 17, Pages 2748–2760, 2006.
26. Charlie Allcock, et al., “EV City Casebook- a look at the global electric vehicle movement,” International Energy Agency, 2012.
27. M Gruning, et al., “Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 3. Assessment of the future electricity sector,” CE Delft, Netherlands, 2011.
28. Fernando Hernandez Sobrino, “Critical analysis on hydrogen as an alternative to fossil fuels and biofuels for vehicles in Europe,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 2, Pages 772–780, 2010
29. David B. Sandalow, Plug-In Electric Vehicles: What Role for Washington, Brookings Institution Press, 2009
30. Mockus S, “The influence of gaseous fuel on the characteristics of car engines,” PhD thesis, Kaunas University of Technology, Kaunas, 2007.
31. Peter Taylor, et al., “Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles” International Energy Agency, Paris, France, 2011.
32. Reijnders L. “Conditions for the sustainability of biomass based fuel use,” Energy Policy, Volume 34, Issue 7, Pages 863–876, 2006.
33. Bob Dinneen, et al., “Accelerating Industry Innovation – 2012 Ethanol Industry Outlook,” Renewable Fuels Association, 2012.
34. Nobuo Tanaka, et al., “Technology Roadmap Biofuels for Transport,” International Energy Agency, Paris, France, 2011.
35. Salvi, B., et al., Alternative fuels for transportation vehicles: A technical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 25, Pages 404–419, 2013.

36. Łukasz Szabłowska, Jarosław Milewska, "Dynamic analysis of compressed air energy storage in the car," *Journal of Power Technologies*, Vol. 91, Pages 23-36, 2011.
37. Demirbas A., "Global biofuel strategies," *Energy Educ Sci Technol*, Vol.17, Pages 27-63, 2006
38. Inga Schulte, "Issues affecting the acceptance of hydrogen fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 29, Issue 7, Pages 677–685, 2004
39. Pang et al., Review of engine cooling technologies for modern engines. *Journal of automotive engineering*, Vol 218, Part D (2004)
40. Wenzel, T., Singer, B.C. and Slott, R., 2000; Some issues in the statistical analysis of vehicle emissions. *Journal of Transportation Statistics*, September 2000. pp 1-14.
41. Baltusis, P. 2004; On-board vehicle diagnostics. Convergence Transportation Electronics Association, Paper 2004-21-0009
42. Fuller, G., 2006; London Air Quality 2004; London Air Quality Network Report 12; Environmental Research Group, London, UK.
43. Harrison, R.M., Tilling, R., Callen Romero, M.S., Harrad, S. and Jarvis, K. 2003; A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmospheric Environment* 37 (17): pp 2391-2402.
44. Shi, J.P., Harrison, R.M., Evans, D.E., Alam, A., Barnes, C. and Carter, G. 2002; A method for measuring particle number emissions from vehicles driving on the road. *Environmental Technology*, Volume 23, Number 1: pp 1-14
45. Hausberger, S; Rodler, J; Sturm, P; and Rexeis, M. 2003. Emission factors for heavy duty vehicles and validation by tunnel measurements. *Atmospheric Environment* 37: pp5237-5245.
46. Bishop, G.A. and Stedman, D.H. 1996; Measuring the emissions of passing cars. *Accounts of chemical research*, Volume 29, Number 10: pp 489-495.

47. Jimenez, J.L., Koplow, M.D., Nelson, D.D., Zahniser, M.S. and Schmidt, S.E. 1999; Characterisation of on-road vehicle NO emissions by a TILDAS sensor. *Journal of the Air and Waste Management Association* 49: pp463-470
48. Moosmuller, H., Mazzoleni, C., Barber, P.W., Kuhns, H.D., Keislar, R.E. and Watson, J.G. 2003; On-road measurement of automotive particulate emissions by ultraviolet lidar and transmissometer: Instrument. *Environmental Science and Technology* 37: pp4971-4978.
49. Bishop, G.A., Stedman, D.H., De La Garza Castro, J., and Davalos, F.J. 1997; On- road remote sensing of vehicle emissions in Mexico; *Environmental Science and Technology* 31: pp 3505–3510.
50. Bradley, K.S., Brooks, K.B., Hubbard, L.K., Popp, P.J. and Stedman, D.H. 2000; Motor-vehicle fleet emissions by OP-FTIR. *Environmental Science and Technology* 34: pp 897-899.
51. Stephens, R.D., Giles, M., McAlinden, K., Gorse, R.A., Hoffman, D. and James, R. 1997; An analysis of Michigan and California CO remote sensing measurements. *Journal of the Air and Waste Management Association* 47: pp 601-607.
52. Pokharel, S.S., Bishop, G.A. and Stedman, D.H. 2002; An on-road motor vehicle emissions inventory for Denver: An efficient alternative to modeling. *Atmospheric Environment* 36: pp5177–5184.
53. R.J. North “Assessment of real-world pollutant emissions from a light duty diesel vehicle”. PhD Thesis, University of London, 2006.
54. Younglove, T., Scora G. and Barth M. 2005; Designing on-road vehicle test programs for the development of effective vehicle emission models. *Transportation Research Record No. 1941*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp 51-59.
55. Arteconi, A., et al., (2010), "Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe", *Appl. Energy*, Vol.87 (6), pp. 2005-2013.

56. 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.
57. 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.)
58. 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.
59. 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.
60. 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.
61. Rabl, A. and de Nazelle, A., (2012), "Benefits of shift from car to active transport", *Transp. Policy*, Vol.19 (1), pp. 121-131.
62. 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.
63. 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.
64. Haydar, F. and Padiaditi, K. 2010. Evaluation of the environmental impact assessment system in Syria. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(6), pp.363-370.

65. 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.
66. Heywood, John B., *Internal combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill International Editions -1988
67. 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.
68. 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
69. Barone, Stefano. Statistics-Driven Development of OBD Systems; An Overview, *Quality and Reliability Engineering International*, 2006, vol 22, 615-628
70. Sturm et al. Determination of Traffic emissions – intercomparison of different calculation methods, *the science of the total environment*, 189/190 (1996) 187-196
71. 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.
72. 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
73. Abdel- Rahman, A.A., On the emissions from internal combustion engines: A review. *International Journal of Energy Research* volume 22 (1998), 483-513
74. 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

75. 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.
76. 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
77. 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
78. . 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.
79. 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.
80. Wielenmann et al., Regulated and unregulated diesel and cold start emissions at different temperatures, *Atmospheric Environment*, vol 39 (2005), 2433-2441)
81. 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)

Приложение А
Результаты моделирования при работе на бензине

Таблица А.1 – Результаты моделирования при работе на бензине

Engine speed	rpm	6500	5999	5499	5000	4499	4000	3500	3000	2500	2000	1499	999
Stoichiometric A/F	-	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569	14.5569
Trapped A/F	-	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Mass Airflow	kg/hr	303.363	302.13	287.655	261.951	233.962	208.909	177.663	150.364	123.124	97.8727	71.9788	47.0609
Pseudo-volumetric efficiency	kg/hr/rpm	0.0466712	0.0503551	0.052301	0.0523903	0.0519915	0.0522271	0.0507606	0.0501214	0.0492496	0.0489363	0.0479859	0.0470619
BMEP	bar	9.6082	10.6601	11.3883	11.7076	11.8387	12.0083	11.7598	11.6498	11.72	11.02	10.56	10.96
Brake Power	kW	83.4387	85.4522	83.6825	78.2076	71.1753	64.1734	54.9896	46.6929	38.0005	29.9542	21.6947	13.6533
BSFC	kg/kW/hr	0.279674	0.271974	0.26442	0.257649	0.252855	0.250414	0.248526	0.247714	0.249236	0.25134	0.255216	0.265143
Brake specific unburned fuel emissions	g/kW/hr	0.133958	0.131021	0.127655	0.124399	0.121559	0.119977	0.119241	0.134408	0.118183	0.127579	0.129036	0.206208
Charging efficiency	-	0.996877	1.0766	1.11053	1.10432	1.09192	1.09296	1.05426	1.03506	1.02077	1.01388	0.998765	0.989147
Delivered efficiency	-	0.996856	1.07658	1.11051	1.1043	1.0919	1.09293	1.05424	1.0351	1.02075	1.01389	0.998771	0.989423
Total delivered efficiency	-	0.996856	1.07658	1.11051	1.1043	1.0919	1.09293	1.05424	1.0351	1.02075	1.01389	0.998771	0.989423
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	%	29.8104	30.6544	31.5301	32.3587	32.9722	33.2936	33.5465	33.6565	33.451	33.171	32.6672	31.4441
EGR	-	5.54385e-09	2.66991e-08	1.96488e-08	-1.5414e-08	5.67302e-09	-1.76585e-08	-1.99873e-09	2.11253e-08	-3.89775e-09	-2.02717e-07	-2.84701e-08	2.34938e-07
FMEP	bar	1.41725	1.32009	1.22447	1.1312	1.04209	0.958835	0.877232	0.801653	0.730322	0.664379	0.604093	0.548416
Friction Energy Loss	%	4.39716	3.79609	3.39009	3.12654	2.90233	2.65842	2.50243	2.316	2.14727	1.96589	1.82291	1.68739
Friction torque	N*m	18.0814	16.8418	15.6218	14.4319	13.295	12.2329	11.1918	10.2275	9.75	8.47619	7.70705	6.99673
Fuel mass flow	kg/hr	23.3356	23.2408	22.1273	20.1501	17.9971	16.0699	13.6664	11.5665	9.11	7.52867	5.53683	3.62007
Fuel volume flow	L/hr	34.1289	33.9902	32.3617	29.47	26.3211	23.5026	19.9874	16.9163	13.8517	11.0109	8.09774	5.29444
GMEP	bar	12.2423	13.1871	13.6787	13.6988	13.5656	13.5559	13.0828	12.8081	12.02	12.0395	11.25	10.33
GMEP from crossing point	bar	11.9513	12.8906	13.4151	13.4709	13.376	13.4032	12.9643	12.7061	12.45	12.0012	11.34	10.99
Engine out unburned fuel flow	g/s	0.0031048	0.00311001	0.00296735	0.00270248	0.00240333	0.00213871	0.00182139	0.0017433	0.00124751	0.00106153	0.00077761	0.000782062
Heat Transfer Rate	W	35020.4	34845.5	33338.4	30905.3	28448	26442.7	23519.5	21096.6	18444.4	16003.9	13543.4	10957.7

Продолжение таблицы А.1

Heat Transfer Loss	%	12.5118	12.5002	12.5613	12.7872	13.1786	13.7187	14.3481	15.2065	16.2362	17.7226	20.3933	25.236
Indicated Power	hp	128.398	128.784	124.286	115.011	103.849	92.9294	79.2431	66.925	54.2307	42.5499	30.7165	19.2919
IMEP	bar	11.0254	11.9802	12.6128	12.8388	12.8808	12.9671	12.637	12.4514	12.1076	ноя.46	ноя.97	10.768
ISAC	kg/kW/hr	3.16841	3.14607	3.10375	3.05432	3.02118	3.01467	3.00656	3.01295	3.04463	3.0846	3.14245	3.27131
ISFC	kg/kW/hr	0.243724	0.242005	0.23875	0.234948	0.232399	0.231898	0.231274	0.231766	0.234202	0.237277	0.241727	0.251639
Indicated Torque	N*m	140.663	152.844	160.915	163.798	164.335	165.436	161.224	158.856	154.469	151.497	145.82	137.379
Lambda	-	0.893049	0.893049	0.893049	0.893049	0.89305	0.893048	0.893049	0.893049	0.893049	0.893049	0.89305	0.893049
Lower Heating Value	J/kg	4.318e+07											
Exhaust port pressure	bar	1.41009	1.40922	1.38476	1.34798	1.30551	1.26806	1.22421	1.18686	1.14937	1.11623	1.08369	1.0544
Trapped equivalence ratio	-	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976	1.11976
Intake port pressure	bar	0.936491	0.930074	0.935852	0.946996	0.958372	0.967168	0.975368	0.981351	0.985333	0.99141	0.994497	0.995306
PMEP	bar	-1.21686	-1.20695	-1.06592	-0.86008	-0.684757	-0.588781	-0.445819	-0.356711	-0.242666	-0.164901	-0.102895	-0.0752768
HC	ppm	69.3108	69.7106	69.8593	69.867	69.5664	69.3308	69.4283	78.5165	68.6168	73.4516	73.1625	112.543
Pumping torque	N*m	-15.5248	-15.3983	-13.5991	-10.9729	-8.73617	-7.5117	-5.68779	-4.55094	-3.09595	-2.10382	-1.31274	-0.960386
Plenum volumetric efficiency	-	0.907575	0.979876	1.01073	1.0037	0.988365	0.98748	0.953132	0.937687	0.919843	0.910474	0.892347	0.879876
Residual gas fraction	%	4.20898	3.6562	3.45073	3.44005	3.85526	4.18125	4.04637	3.89263	5.16793	5.19359	6.24027	6.98
Scavenging efficiency	-	0.95791	0.963438	0.965493	0.965599	0.961447	0.958187	0.959536	0.961074	0.948321	0.948064	0.937597	0.931502
Scavenging ratio	-	0.957889	0.96342	0.965476	0.965582	0.961429	0.958166	0.959517	0.961114	0.948296	0.948071	0.937603	0.931762
Ambient reference temperature	K	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
Exhaust gas temperature	K	1302.14	1293.61	1279.14	1264.53	1249.18	1236.65	1221.89	1206.25	1185.5	1166.87	1132.96	1075.87
Intake port gas temperature	K	309.981	308.156	307.941	309.337	311.913	313.652	313.929	314.075	316.481	318.319	320.778	324.279
Brake Torque	N*m	122.582	136.002	145.293	149.366	151.04	153.203	150.032	148.629	145.152	143.021	138.113	130.383
Trapping ratio	-	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	0.999958	1.00003	0.999993	0.999994	0.999721
Total volumetric efficiency	-	0.833359	0.899136	0.933883	0.935477	0.928357	0.932563	0.906378	0.894964	0.879398	0.873803	0.856833	0.840334

Приложение Б
Результаты моделирования при работе на метаноле

Таблица Б.1 – Результаты моделирования при работе на метаноле

Engine speed	rpm	6500	6000	5500	5000	4499	3999	3500	2999	2499	2000	1499	1000
Stoichiometric A/F	-	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133	6.43133
Trapped A/F	-	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Mass Airflow	kg/hr	319.787	323.588	313.734	291.784	261.407	236.816	199.586	167.208	138.806	107.964	78.3471	50.4164
Pseudo-volumetric efficiency	kg/hr/rpm	0.0491979	0.0539314	0.0570424	0.0583567	0.0580904	0.0592041	0.0570245	0.0557362	0.0555225	0.0539821	0.0522315	0.0504161
BMEP	bar	5.32874	6.19067	6.88458	7.36076	7.58007	7.90049	7.71597	7.61859	7.64172	7.43327	7.05087	6.50227
Brake Power	kW	46.2754	49.625	50.5886	49.1705	45.5719	42.2207	36.0803	30.5356	25.5236	19.8619	14.1301	8.68719
BSFC	kg/kW/hr	0.531578	0.50159	0.477052	0.456471	0.441242	0.431462	0.425516	0.421219	0.418334	0.418134	0.426516	0.446425
Brake specific unburned fuel emissions	g/kW/hr	0.249765	0.238315	0.22752	0.218237	0.210719	0.205735	0.201447	0.199536	0.197548	0.196884	0.198907	0.249893
Charging efficiency	-	0.996216	1.09362	1.15009	1.168	1.15492	1.17184	1.11843	1.08688	1.08341	1.05272	1.02333	0.999389
Delivered efficiency	-	0.996186	1.0936	1.15006	1.16797	1.1549	1.17181	1.1184	1.08686	1.08338	1.05269	1.0233	0.999448
Total delivered efficiency	-	0.996186	1.0936	1.15006	1.16797	1.1549	1.17181	1.1184	1.08686	1.08338	1.05269	1.0233	0.999448
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	%	33.6762	35.6896	37.5254	39.2173	40.5708	41.4904	42.0702	42.4994	42.7925	42.813	41.9715	40.0997
EGR	-	-8.63908e-10	1.72021e-08	1.90419e-08	4.4874e-09	-4.08777e-09	2.26397e-08	6.38373e-08	1.16059e-08	9.11387e-09	-1.01344e-08	-7.48122e-09	-4.32956e-08
FMEP	bar	1.40261	1.30486	1.20967	1.11739	1.02827	0.945641	0.864428	0.788603	0.718301	0.651819	0.590986	0.534887
Friction Energy Loss	%	8.86415	7.52262	6.59347	5.95334	5.5036	4.96615	4.71316	4.39913	4.02238	3.75424	3.51795	3.29867
Friction torque	N*m	17.8946	16.6475	15.4331	14.2558	13.1187	12.0646	11.0284	10.0611	9.16413	8.31595	7.53984	6.82412
Fuel mass flow	kg/hr	24.599	24.8914	24.1334	22.4449	20.1082	18.2166	15.3528	12.8622	10.6774	8.30495	6.02671	3.87818
Fuel volume flow	L/hr	31.0872	31.4568	30.4988	28.365	25.4119	23.0215	19.4022	16.2547	13.4936	10.4955	7.61631	4.90109
GMEP	bar	7.89826	8.67008	9.16923	9.38252	9.32928	9.46673	9.05668	8.78087	8.62888	8.26597	7.7555	7.11668
Engine out unburned fuel flow	g/s	0.00321055	0.00328511	0.0031972	0.00298079	0.00266746	0.00241286	0.00201896	0.00169248	0.00140059	0.00108625	0.000780713	0.000603019
Heat Transfer Rate	W	18404.9	18398.1	17684	16388.4	14838.3	13819.8	12186.3	10740.7	9480.03	8112	6719.47	5277.77
Heat Transfer Loss	%	13.3939	13.2316	13.1175	13.071	13.2099	13.5808	14.2094	14.9488	15.8941	17.4856	19.9593	24.362

Продолжение таблицы Б.1

Indicated Power	hp	78.3906	80.5752	79.7605	75.9485	69.4031	63.3958	53.805	45.1875	37.445	28.9709	20.537	12.608
IMEP	bar	6.73136	7.49553	8.09425	8.47815	8.60833	8.84613	8.58039	8.40719	8.36002	8.08509	7.64185	7.03716
ISAC	kg/kW/hr	5.47056	5.38551	5.27484	5.15202	5.05095	5.00941	4.97442	4.9622	4.97107	4.99751	5.1159	5.36241
ISFC	kg/kW/hr	0.420813	0.41427	0.405757	0.39631	0.388535	0.38534	0.382648	0.381708	0.38239	0.384424	0.393531	0.412493
Indicated Torque	N*m	85.8791	95.6285	103.267	108.165	109.826	112.859	109.469	107.259	106.658	103.15	97.4953	89.7805
Lambda	-	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135	2.02135
Lower Heating Value	J/kg	2.011e+07											
Exhaust port pressure	bar	1.42182	1.42929	1.41641	1.38478	1.33934	1.30333	1.24998	1.20618	1.16789	1.12775	1.09076	1.05754
Trapped equivalence ratio	-	0.494718	0.494718	0.494718	0.494718	0.494719	0.494718	0.494718	0.494719	0.494718	0.494718	0.494719	0.494718
Intake port pressure	bar	0.929171	0.920997	0.924496	0.934929	0.948321	0.958829	0.96926	0.977316	0.982745	0.99005	0.993884	0.994957
PMEP	bar	-1.16691	-1.17455	-1.07497	-0.904369	-0.720951	-0.620596	-0.476285	-0.373674	-0.268858	-0.180883	-0.113644	-0.0795229
HC	ppm	29.481	29.8114	29.9254	29.9983	29.9645	29.9189	29.7046	29.723	29.63	29.5446	29.2614	35.1227
Pumping torque	N*m	-14.8875	-14.985	-13.7146	-11.538	-9.19794	-7.91761	-6.07647	-4.76736	-3.43011	-2.30772	-1.44988	-1.01456
Plenum volumetric efficiency	-	0.962695	1.0579	1.11274	1.12876	1.11273	1.12684	1.07542	1.04558	1.03866	1.00499	0.97131	0.941947
Residual gas fraction	%	6.03393	4.98067	4.61748	4.38572	4.49354	4.63869	5.32168	5.2631	5.55961	5.83156	6.73423	7.59854
Scavenging efficiency	-	0.939661	0.950193	0.953825	0.956143	0.955065	0.953613	0.946783	0.947369	0.944404	0.941684	0.932658	0.924015
Scavenging ratio	-	0.939632	0.950169	0.953803	0.956122	0.955043	0.953592	0.946758	0.947344	0.944378	0.941657	0.932626	0.92407
Ambient reference temperature	K	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
Exhaust gas temperature	K	873.751	868.303	857.192	844.9	833.831	823.937	813.332	802.692	795.123	787.34	768.348	737.008
Intake port gas temperature	K	291.567	289.416	288.854	289.981	292.175	294.101	294.595	295.338	297.169	299.197	301.756	305.664
Brake Torque	N*m	67.9844	78.981	87.834	93.9091	96.707	100.795	98.4408	97.1985	97.4936	94.8341	89.9554	82.9564
Trapping ratio	-	1.00003	1.00003	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00003	1.00003	1.00003	1.00003	1.00003	0.999941
Trapping ratio (air-only)	-	1.00003	1.00003	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00003	1.00003	1.00003	1.00003	1.00003	0.999941
Trapped air volumetric efficiency	-	0.878501	0.963019	1.01857	1.04204	1.03728	1.05717	1.01825	0.995248	0.991434	0.963929	0.932674	0.900173
Total volumetric efficiency	-	0.878474	0.962995	1.01855	1.04201	1.03726	1.05714	1.01823	0.995222	0.991406	0.963902	0.932642	0.900226

Приложение В
Результаты моделирования при работе на этаноле

Таблица В.1 – 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

Продолжение таблицы В.1

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
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

Приложение Г
Результаты моделирования при работе на E85

Таблица Г.1 – Результаты моделирования при работе на E85

Engine speed	rpm	6500	5999	5500	5000	4500	4000	3500	3000	2499	1999	1500	999
Stoichiometric A/F	-	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789	9.78789
Trapped A/F	-	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Mass Airflow	kg/hr	313.558	315.3	303.783	279.699	249.441	224.084	189.451	160.289	130.758	103.689	75.4291	48.7263
Pseudo-volumetric efficiency	kg/hr/rpm	0.0482397	0.05255	0.0552333	0.0559397	0.0554314	0.0560209	0.0541288	0.0534297	0.0523036	0.0518445	0.0502861	0.0487273
BMEP	bar	7.81665	8.85367	9.63722	10.0536	10.1889	10.4435	10.2159	10.1478	9.92003	9.72776	9.30781	8.69178
Brake Power	kW	67.8807	70.9719	70.8152	67.159	61.2567	55.8108	47.7701	40.6729	33.1331	25.9928	18.6531	11.6121
BSFC	kg/kW/hr	0.355327	0.341739	0.329985	0.320364	0.313236	0.308851	0.305069	0.303148	0.303573	0.306857	0.311061	0.322782
Brake specific unburned fuel emissions	g/kW/hr	0.169079	0.163898	0.158696	0.154243	0.150357	0.147738	0.145627	0.148139	0.143654	0.149437	0.162666	0.27222
Charging efficiency	-	1	1.09064	1.13931	1.14516	1.12815	1.13564	1.08809	1.06798	1.04748	1.03744	1.01115	0.990628
Delivered efficiency	-	0.999976	1.09062	1.13929	1.14514	1.12813	1.13562	1.08807	1.06797	1.04745	1.03742	1.01117	0.990969
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	%	34.5992	35.9749	37.2564	38.3753	39.2485	39.8057	40.2992	40.5545	40.4977	40.0644	39.5229	38.0877
EGR	-	-1.85815e-09	-2.27317e-08	-2.75203e-08	-3.05932e-09	-1.50509e-09	4.30731e-09	-2.35476e-08	2.18732e-08	1.00818e-08	-1.18517e-07	-4.1522e-08	1.53024e-07
FMEP	bar	1.41087	1.31374	1.21865	1.12595	1.0366	0.953687	0.872208	0.796667	0.725387	0.65923	0.598438	0.542479
Friction Energy Loss	%	6.24498	5.33808	4.71117	4.29784	3.99303	3.635	3.44065	3.18378	2.96133	2.71508	2.54109	2.37717
Friction torque	N*m	17.9999	16.7607	15.5477	14.365	13.225	12.1672	11.1277	10.1639	9.25453	8.4105	7.63491	6.92098
Fuel mass flow	kg/hr	24.1199	24.2539	23.368	21.5153	19.1878	17.2372	14.5732	12.3299	10.0583	7.97607	5.80224	3.74818
Fuel volume flow	L/hr	31.1817	31.3549	30.2096	27.8146	24.8056	22.2839	18.8399	15.9399	13.0032	10.3113	7.50102	4.84557
GMEP	bar	10.4343	11.3741	11.9443	12.0801	11.9389	12.0099	11.5549	11.3161	10.9018	10.5612	10.0144	9.31166
Engine out unburned fuel flow	g/s	0.00318811	0.00323116	0.00312169	0.00287746	0.00255844	0.00229038	0.00193239	0.00167368	0.00132214	0.00107897	0.00084284	0.00087806
Heat Transfer Rate	W	27413.2	27414.3	26371.5	24476	22335.2	20807.6	18471.2	16498	14430.7	12387.7	10402.3	8320.24
Heat Transfer Loss	%	13.9727	13.896	13.8742	13.9858	14.3106	14.8405	15.5824	16.4499	17.6383	19.0939	22.041	27.2904

Продолжение таблицы Г.1

Indicated Power	hp	107.46	109.297	106.973	100.148	90.504	81.678	69.5301	58.8253	47.6813	37.2192	26.6224	16.544
IMEP	bar	9.22752	10.1674	10.8559	11.1796	11.2255	11.3972	11.0881	10.9445	10.6454	10.387	9.90625	9.23426
ISAC	kg/kW/hr	3.91298	3.86857	3.80824	3.74527	3.69604	3.6791	3.65393	3.65406	3.67753	3.73595	3.7995	3.94965
ISFC	kg/kW/hr	0.300999	0.297583	0.292942	0.288098	0.284311	0.283008	0.281072	0.281082	0.282887	0.287381	0.292269	0.30382
Indicated Torque	N*m	117.725	129.717	138.5	142.63	143.216	145.406	141.463	139.63	135.815	132.518	126.385	117.811
Lambda	-	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817	1.32817
Exhaust port pressure	bar	1.41808	1.42263	1.40569	1.36774	1.32405	1.28668	1.23809	1.1977	1.1576	1.12247	1.08715	1.0558
Trapped equivalence ratio	-	0.752915	0.752914	0.752915	0.752915	0.752915	0.752914	0.752916	0.752916	0.752916	0.752915	0.752914	0.752914
Intake port pressure	bar	0.932034	0.924674	0.929023	0.940057	0.952859	0.962695	0.972182	0.979222	0.984048	0.99071	0.994194	0.995109
PMEP	bar	-1.20676	-1.20673	-1.08841	-0.900504	-0.713405	-0.61271	-0.466766	-0.3716	-0.256358	-0.174183	-0.108125	-0.0774054
PMEP from crossing point	bar	-0.9341	-0.929594	-0.843196	-0.688002	-0.537087	-0.47038	-0.35767	-0.278078	-0.205571	-0.139684	-	-0.0659588
HC	ppm	46.0453	46.4095	46.537	46.59	46.4495	46.2886	46.1925	47.287	45.7913	47.1253	50.6038	81.612
Pumping torque	N*m	-15.3959	-15.3955	-13.886	-11.4887	-9.10167	-7.81699	-5.95503	-4.7409	-3.27063	-2.22224	-1.37947	-0.987543
Plenum volumetric efficiency	-	0.941635	1.02746	1.07345	1.07763	1.05814	1.06292	1.01867	1.00106	0.977643	0.964869	0.9351	0.910777
Plenum volumetric efficiency (air-only)	-	0.920395	1.00429	1.04923	1.05333	1.03427	1.03894	0.995698	0.978475	0.955591	0.943105	0.914008	0.890233
Residual gas fraction	%	4.83742	4.08479	3.82126	3.71169	4.00202	4.33456	4.53325	4.18283	5.37729	5.16976	6.22899	7.08888
Scavenging efficiency	-	0.951626	0.959152	0.961787	0.962883	0.95998	0.956654	0.954667	0.958171	0.946227	0.948302	0.93771	0.929111
Scavenging ratio	-	0.951603	0.959132	0.961769	0.962865	0.959961	0.956633	0.954646	0.958161	0.946202	0.948289	0.937731	0.929431
Ambient reference temperature	K	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
Exhaust gas temperature	K	1115.32	1109.65	1097.53	1082.98	1069.28	1057.96	1047.16	1034.87	1021.12	1004.07	980.545	936.482
Intake port gas temperature	K	299.41	297.397	296.967	298.224	300.524	302.426	302.847	303.324	305.4	307.219	309.812	313.622
Brake Torque	N*m	99.7254	112.956	122.952	128.265	129.991	133.239	130.335	129.466	126.56	124.107	118.75	110.89
Trapping ratio	-	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00002	1.00001	1.00003	1.00001	0.999978	0.999656
Total volumetric efficiency	-	0.861365	0.93833	0.986242	0.998855	0.98978	1.00031	0.96652	0.954037	0.933929	0.925733	0.897905	0.870072