

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)

Энергетические комплексы и системы управления

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Анализ термодинамики рабочего процесса бензинового двигателя с

добавками водорода

Студент Даниил Евгеньевич Баранов

(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Научный к.т.н., доцент, В.В. Смоленский
руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценки влияния добавления водорода в рабочий процесс ДВС	8
Глава 2 описание оборудования и проведение экспериментальных исследований	45
ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки влияния водорода на термодинамику рабочего процесса ДВС	49
Глава 4 Выявление возможностей повышения эффективности ДВС путем добавления водорода в топливную смесь.....	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Из-за быстрорастущего количества автомобилей в мире, необходимо решение энергоэкологических проблем. Это приводит к необходимости постоянного поиска решений по улучшению и совершенствованию автомобильных двигателей.

В настоящее время известно, что значительная часть мирового потребления энергии приходится на автомобильный транспорт. Мировой автопарк насчитывает более 800 миллионов автомобилей, на долю которого приходится половина всех вредных выбросов в атмосферу, а в крупных городах этот показатель достигает 85–90 %. Очевидно, что личный автомобиль по-прежнему будет оставаться основным видом индивидуального транспорта. Это же утверждение справедливо и для России. Стоит ожидать некоторого увеличения использования автобусов, рельсового транспорта и некоторых других видов общественного транспорта, но создание легковых и грузовых автомобилей с высокими показателями топливной экономичности, в свою очередь, может послужить причиной значительного снижения заинтересованности в развитии указанных видов общественного транспорта. Кроме того, свобода, предоставляемая личным автомобилем, будет по-прежнему оставаться важным элементом жизни нашего общества. Предполагается, что к 2022 году в Российской Федерации количество личных автомобилей возрастет в 2–2,5 раза и составит 20–25 единиц на 100 человек.

Увеличивающийся рост автопарка выявил ряд проблем в его использовании. Вопросы надежного энергоснабжения, контроля вредных выбросов и образование парниковых газов вышли на передний план. Необходимость в чистом воздухе, чистой воде, экологически чистых источниках энергии, биоразлагающихся и возобновляемых, становится актуальной не только для промышленно развитых регионов и стран, но и для России. В итоге, решение данных проблем может привести к более активной

разработке и использованию возобновляемых источников энергии. Актуальным становится и вопрос многообразия энергетических носителей для автотранспорта. Также очевидно, что решение многих проблем возможно только через усовершенствование и ввод энергосберегающих и экологически чистых технологий на транспорт и применение экологически чистых топлив.

Сейчас практически в каждой промышленно развитой стране проводятся обширные исследовательские работы автопроизводителей и научных организаций в области создания наиболее приемлемых с точки зрения экологичности, высокой эффективности, низких издержек производства и значительных запасов новых видов моторного топлива. В США, Европе, Японии и других странах развернулись крупномасштабные работы по исследованию применения водорода в качестве моторного топлива. Также исследуются метанол, биогаз, синтез-газ, диметил эфир и другие виды альтернативного топлива. Но на данный момент ни один из вышеперечисленных видов топлива, по тем или иным причинам, прежде всего по экономическим, не могут составить конкуренцию традиционному топливу. В настоящее время в плане улучшения экологической ситуации в городах при минимальных финансовых затратах очевидно, что только газомоторное топливо может стать реальной альтернативой жидкому нефтяному топливу.

Наиболее существенное преимущество водорода по сравнению с другими альтернативными видами топлива - это разновидность производственных ресурсов, таких как ядерная энергия, биомасса, возобновляемые источники энергии, обычные виды топлива и так далее. С 70-х годов прошлого века, автостроителей привлекает использование водорода в качестве добавки к топливу. Данная научно-исследовательская работа приводит анализ влияния добавки водорода в углеводородовоздушную смесь бензинового двигателя. В данной работе представлен анализ положительных и отрицательных сторон данного процесса. Анализ

различных видов топлива их сравнение представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 - Сравнение выбросов двигателей на различных видах топлива

Топливо	СО	НС	NO _x
Бензин без свинца (катализатор с тремя каналами)	100	100	100
Дизельное топливо	20,48	80,93	152,27
Дизельное топливо (с катализатором для NO _x)	20,48	80,93	143,16
Бензин (с системой питания learn burn)	15,87	9,51	145,44
Бензин (двухфазовый мотор, катализированный для NO _x)	14,59	10,09	51,87
Этанол	15,43	9,47	53,18
Метанол	14,51	10,92	51,92
Сжиженный газ (катализатор с тремя каналами)	13,62	9,56	49,08
МЕТАН (катализатор с тремя каналами)	13,66	10,02	50,89
Электрическое питание	0	0	0
Водород	0	0	9,12

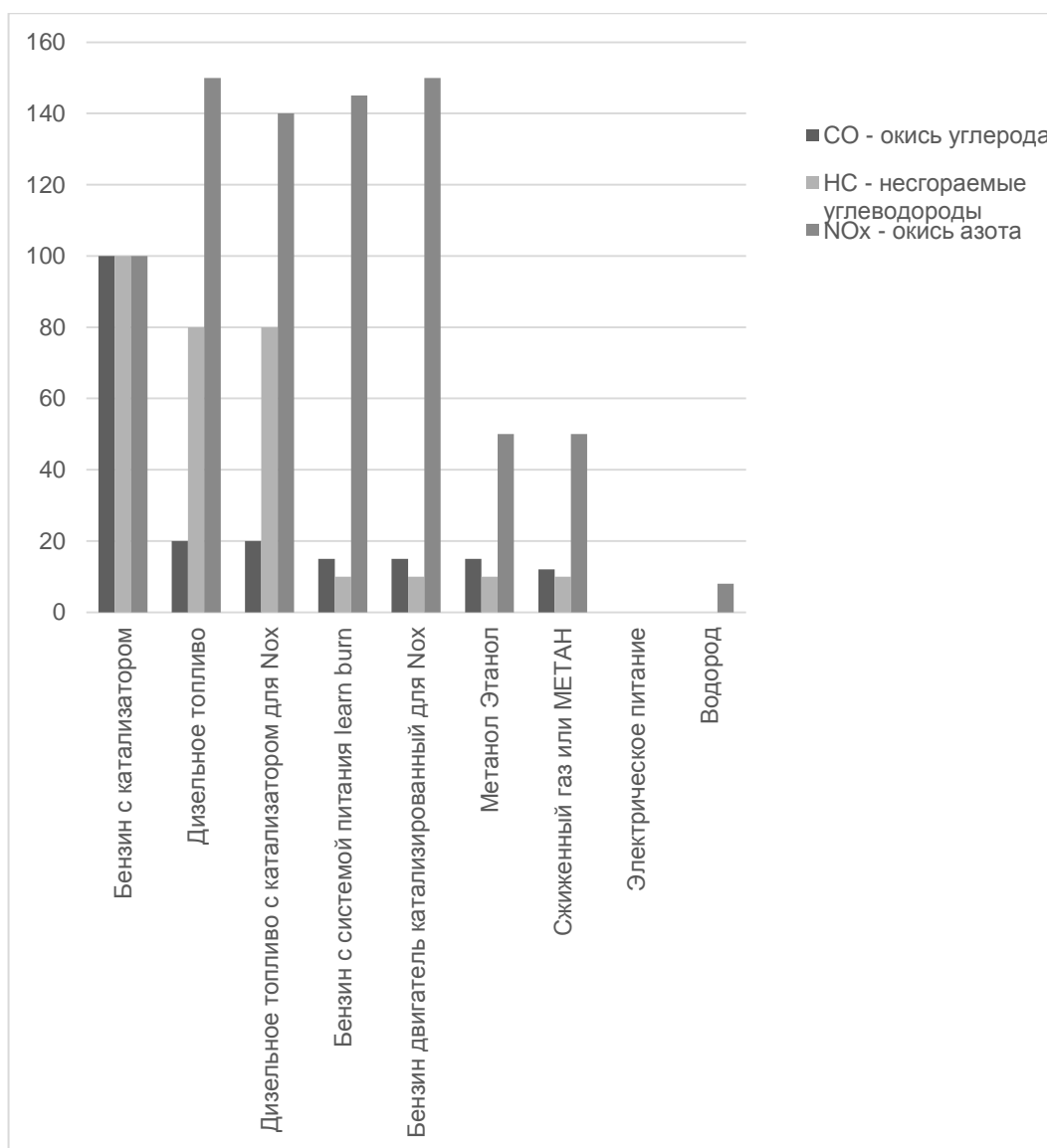


Рисунок 1 – Уровень загрязнения различных видов двигателей по сравнению с катализированным двигателем, который принят за критерий измерения в 100 единиц

Цель работы заключается в анализе влияния добавления водорода в бензиновый двигатель и как это повлияет на экономию бензина, увеличение мощности и полному сгоранию топлива.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением **следующих задач:**

Провести оценку влияния водорода на углеводородовоздушную смесь бензинового двигателя.

Выявить возможность повышения эффективности ДВС за счет добавления водорода

Объект исследования: ДВС с искровым зажиганием.

Предмет исследования: процесс сгорания топливо-воздушной смеси с добавлением водорода.

Методы исследования.

Метод экспериментального исследования, метод статистической обработки результатов эксперимента и моделирования рабочего процесса.

Достоверность полученных результатов исследования обусловлена большим объемом экспериментов, анализом статей других авторов и их опыта, применением методов статистической обработки данных.

Научная новизна исследования.

Выявлена возможность повышения эффективности ДВС путем добавления водорода в топливную смесь.

Практическая значимость работы.

Добавление водорода может улучшить характеристики топливной смеси, улучшить, повысить эффективность двигателя и повысить его мощность.

На защиту выносятся:

1. оценка влияния водорода при добавлении в рабочий процесс ДВС
2. выявление возможностей повышения ДВС за счет добавления водорода в процесс сгорания топлива.

Апробация работы.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» и на студенческой конференции в 2020 и 2021 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 1 печатная работа.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 15 наименований. Работа изложена на 71 странице машинописного текста, иллюстрированного 7-ю таблицами и 38 рисунками.

ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценки влияния добавления водорода в рабочий процесс ДВС

Водород – бесцветный, не имеющий запаха газ, является самым легким и наиболее распространенным элементом на планете. Тем не менее, он не встречается в природе в качестве отдельного элемента, а находится в ковалентных соединениях с большинством неметаллических элементов или в молекулярной форме (вода, нефть, биомасса). Это означает, что для использования водорода в качестве топлива он должен быть отделен от своих атомарных соединений с помощью процессов конверсии, включая паровое реформирование и электролиз.

Электролиз — это технология, используемая как в производстве водорода, так и в технологии топливных элементов. В отличие от сжигания топлива в двигателе внутреннего сгорания (ДВС), электролиз осуществляется за счет химической реакции, которая приводит в действие электрические токи через H_2O , разделяя два компонента на их соответствующие газы (водород и кислород). В то время как существуют различные технологии электролиза, оборудование обычно состоит из катодов из драгоценных металлов, которые увеличивают затраты на производство уже технологически неэффективного метода конверсии.

Конечное состояние водорода, или водород, выделенный из его соединений, распадается на три категории: коричневый, синий и зеленый водород. Коричневый водород поступает из природного газа или угля с выделением CO_2 в качестве побочного продукта. Синим считается, когда выделяющийся CO_2 может быть получен из природного газа в процессе, называемом улавливанием и хранением углерода. Наконец, название "Зеленый водород" дается, когда он поступает из возобновляемых источников — ветровых, солнечных, гидро - геотермальных. Зеленый водород является конечной целью для большинства стран, поскольку

возобновляемые источники не производят побочных продуктов углекислого газа.

В настоящее время, водород используется как добавка, только в ходе демонстрационных испытаний. Контроль качества водорода необходим, чтобы избежать негативного влияния на работу топливной системы. В основном транспортные средства на топливных элементах используют два типа водородного топлива, а именно - «тип I сорт D» и «тип II сорт D», представленных в таблице 2. Эти сорта водородного топлива применяются на транспортных средствах с протообменной мембраной в процессе демонстрационных эксплуатационных испытаний в ограниченном масштабе. Цель данного анализа и применения водорода в топливных системах - способствование осуществлению быстрой и эффективной разработки дорожных транспортных средств, улучшению воспламенения топливной смеси, улучшение сгорания топлива и, следовательно, снижению токсичности выхлопов.

Таблица 2 – Критерии оценки качества водородного топлива, включающие значения предельных характеристик

Характеристики (проба)	Тип I Сорт D	Тип II Сорт D	Лабораторные испытательные методы
Индекс водородного топлива (минимальная объемная концентрация)	99,99%	99,99%	
Пара-водород (минимальная объемная концентрация)	Не определяется	95,0%	
Максимальные значения концентрации неводородных ингредиентов			
Общее содержание газов	100 мкмоль/моль	100 мкмоль/моль	
Вода (H ² O)	5 мкмоль/моль	5 мкмоль/моль	ASTM D6348, ASTM D5454, ASTM D1946, ASTM D5466, JIS K0225

Продолжение таблицы 2

Всего углеводородов (на основе C1)	2 мкмоль/моль	2 мкмоль/моль	EPA TO12, EPA TO15, ASTM D1946, ASTM D5466, ASTM D6968, JIS K 0114
Кислород (O2)	5 мкмоль/моль	5 мкмоль/моль	ASTM D1946, ASTM D5466, JIS K 0225
Гелий (He), азот (N2), аргон (Ar)	100 мкмоль/моль	100 мкмоль/моль	ASTM D1946, ASTM D5466, JIS K 0114
Двуокись углерода (CO2)	2 мкмоль/моль	2 мкмоль/моль	ASTM D1946, ASTM D5466, J IS K 0114, JIS K 0123
Окись углерода (CO)	0,2 мкмоль/моль	0,2 мкмоль/моль	EPA 25C, ASTM D1946, ASTM D5466, JIS K 0114, JIS K 0123
Всего соединений серы	0,004 мкмоль/моль	0,004 мкмоль/моль	ASTM D1946, ASTM D5466, ASTM D5504, JIS K 0127
Формальдегид (HCHO)	0,01 мкмоль/моль	0,01 мкмоль/моль	EPA метод 11, NIOSH 2541, EPA T015, ASTM D1946, ASTM D5466, JIS K 0114, 0124, 0123
Муравьиная кислота (НСООН)	0,2 мкмоль/моль	0,2 мкмоль/моль	ASTM D1946, ASTM D5466, JIS K 0123, 0127
Аммиак (NH3)	0,1 мкмоль/моль	0,1 мкмоль/моль	ASTM D1946, ASTM D5466, EPA T015, JIS K 0127
Всего галогенированных соединений	0,05 мкмоль/моль	0,05 мкмоль/моль	EPA 200.7, JIS K 0101
Максимальный размер частиц	10 мкм	10 мкм	SCAQMD метод 301-91
Максимальная концентрация частиц	1 мкг/л при 20°C и 101,325 кПа	1 мкг/л при 20°C и 101,325 кПа	Гравиметрический метод (EPA 625/R-96/010A)

Добавление водорода является эффективным способом повышения производительности бензинового двигателя в экономичных условиях.

Эксперименты, приведенные в Elsevier Ltd направленные на изучение влияния добавки водорода на характеристики горения и эмиссии бензинового двигателя с искровым зажиганием при различных нагрузках и экономичных условиях, где к бензиновому четырехтактному двигателю была добавлена система впрыска водорода с электронным управлением, при этом система впрыска бензина оставалась неизменной. Гибридный электронный блок управления был разработан для того чтобы управлять подачей искры, впрыском и количеством водорода и бензина. Испытание проводилось при постоянном числе оборотов двигателя - 1400 оборотов в минуту, которое представляет примерные обороты двигателя в типичных городских условиях со сниженной интенсивностью движения. Две объемные доли водорода в общем заборе 0% и 3% были достигнуты путем регулирования продолжительности впрыска водорода в соответствии с расходом воздушного потока. При заданном уровне добавления водорода расход бензина был уменьшен для обеспечения того, чтобы коэффициенты избытка воздуха сохранялись на уровне 1,2 и 1,4, соответственно. Для заданной фракции смешивания водорода и коэффициента избытка воздуха нагрузка двигателя, которая была представлена на впускных коллекторах абсолютным давлением, увеличивалась за счет увеличения открытия дроссельной заслонки. Для всех испытаний было принят режим срабатывания искры для обеспечения максимального крутящего момента. Экспериментальные результаты показали, что средний эффективный крутящий момент повышался после добавления водорода только в условиях малых нагрузок. Однако при высоких нагрузках на гибридный водородно-бензиновый двигатель получался уменьшенный эффективный крутящий момент, чем при обычном бензиновом топливе. Тепловой КПД тормоза двигателя был также отчетливо повышен. Коэффициент вариации указанного среднего эффективного давления гибридного двигателя снижался с увеличением

нагрузки двигателя. В целом, влияние добавления водорода на улучшение характеристик сгорания и выбросов двигателя было более выраженным при низких оборотах двигателя, чем при высоких.

Также проводились экспериментальные исследования, в которых контролировалось время впрыска, подача воздуха, соотношение водорода и бензина. Двигатель работал при оборотах 790 об/мин и 1400 об/мин, чтобы увидеть циклические изменения двигателя. Установлено, что добавление водорода эффективно сказывается на мощности двигателя при малых нагрузках. Время зажигания и степень сжатия также влияет на технические характеристики двигателя. А именно – при повышении сроков зажигания, падала производительность двигателя, тогда как степень сжатия улучшала производительность.

Модификация впускного коллектора двигателя под создания вихря, для создания закрученного потока с углом входа 20 градусов уменьшила продолжительность горения и уменьшила циклические изменения с оптимальным завихрением потока.

Еще рассматривался дизельный двигатель, выполненный для работы с использованием водорода в двухтопливном режиме с дизелем.

Результаты показали улучшение теплового КПД двигателя, снижение удельного расхода энергии с помощью увеличения доли водорода. С другой стороны, подача водорода в топливо, впрыскиваемое в двигатель, вызывала резкое повышение давления в цилиндре и передачу тепла в окружающую среду.

В экспериментальном методе, приведенном ниже была использована установка (рисунок 2), включающая в себя – четырехтактный двигатель с воздушным охлаждением, искра подается с модифицированной головки блока цилиндров типа L. Основные технические характеристики двигателя приведены в таблице 3. Водород подается при давлении 5 бар. Двигатель работает с широко открытым дросселем, в условиях обедненной смеси и с различной степень сжатия. Экспериментальные исследования проводятся

при постоянных оборотах двигателя 1600об/мин. Давление в цилиндре зависит от угла поворота кривошипа, измеряется пьезоэлектрическим датчиком давления (Kistler 6052-C) и кодером вала (Kistler 2618-B). Массовый расход водородного топлива измеряется с помощью расходомеров Aalborg-GFC67 и Aalborg-GFM77. Температура всасываемого воздуха выдерживается постоянно в 30°C. Время зажигания и продолжительность впрыска управляются электронным блоком управления Motec-M4. Давление воздуха на входе измеряется датчиком абсолютного давления. Впрыскиваемый водород имеет чистоту в 99,9%. Основные теплофизические свойства двигателя указаны в таблице 4.

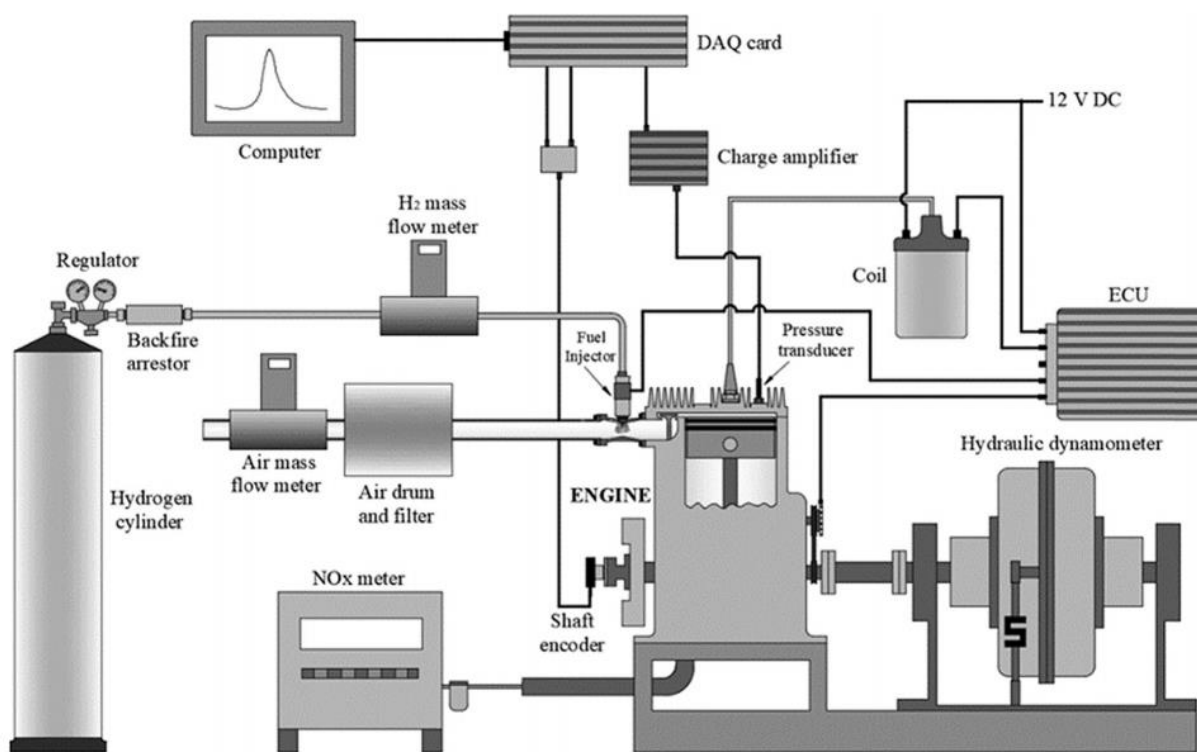


Рисунок 2 - Схема экспериментальной установки

Таблица 3 – Технические характеристики экспериментальной установки

Диаметр отверстия цилиндра	85,7 мм
Ход поршня	82,6 мм
Максимальная мощность	8,82 кВт
Максимальный крутящий момент	25 Нм
Максимальная частота вращения	3600 об/мин
Коэффициент эквивалентности	0,6

Таблица 4 – Основные теплофизические свойства водородного топлива

Свойство	Объем	Единица измерения
Степень очистки	99,99%	%
Температура сгорания	120	МДж
Плотность	0,0824	Кг*м ⁻³
Температура самовоспламенения	858	К
Скорость пламени	1,85	М*с ⁻¹
Адиабатическая температура пламени	2480	К
Стехиометрическое отношение воздуха к топливу (по массе)	0,029	-
Стехиометрическое отношение воздуха к топливу (объемное)	20,53	%

В данном исследовании были проведены 50 последовательных циклов горения с 3600 импульсами за цикл горения. Затем, средние значения 50 циклов сгорания были использованы по порядку чтобы избежать влияния циклических колебаний на внутрицилиндровое горения и указанные параметры двигателя (рисунки 3; 4; 5; 6; 7).

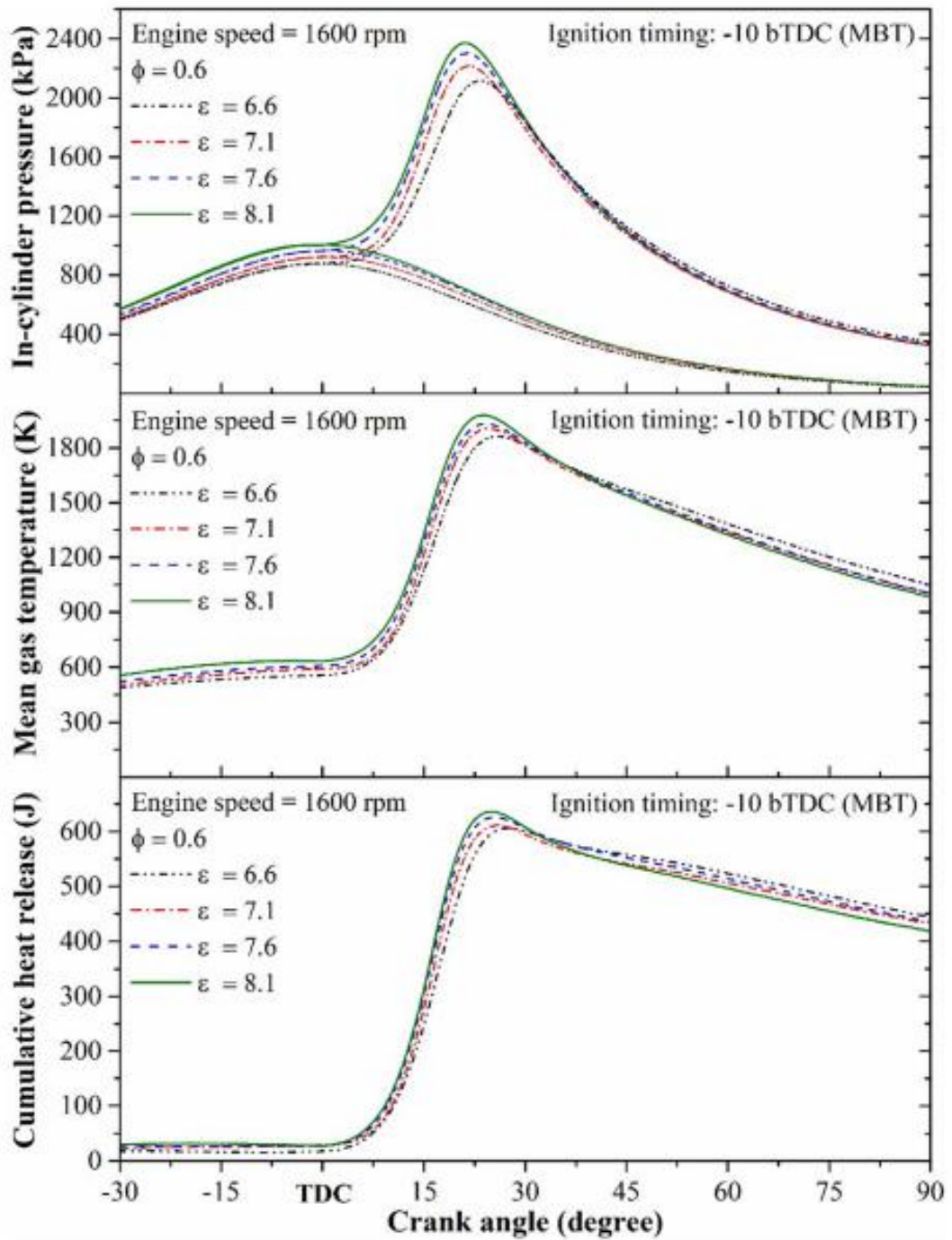


Рисунок 3 – Давление в цилиндре, средняя температура и изменения тепловыделения с углом кривошипа

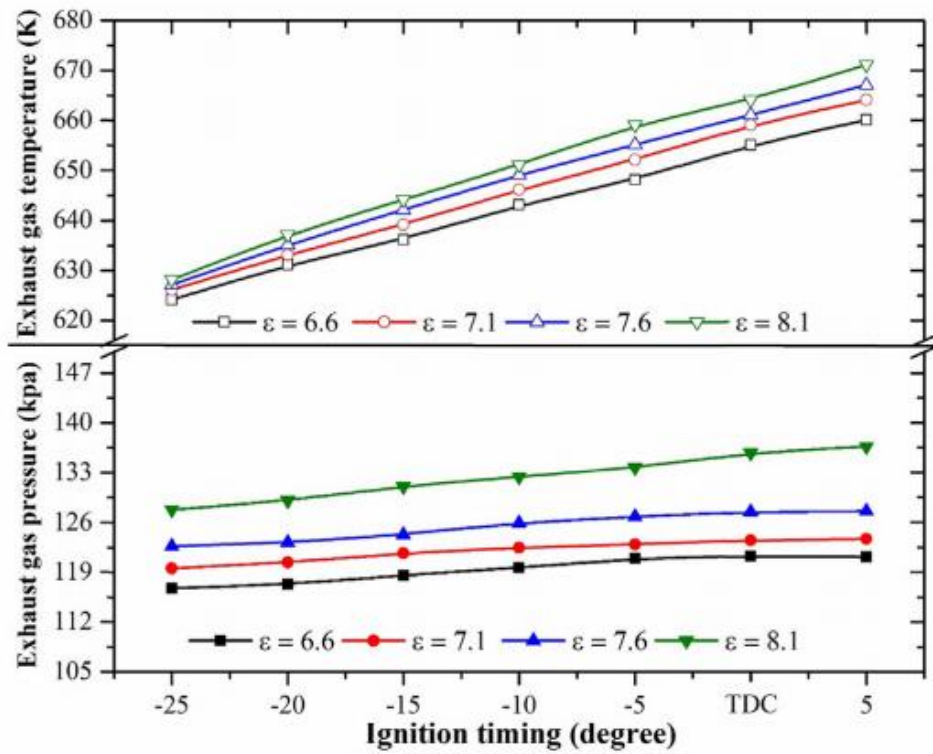


Рисунок 4 – Изменение давления и температуры выхлопных газов в зависимости от времени зажигания и степени сжатия

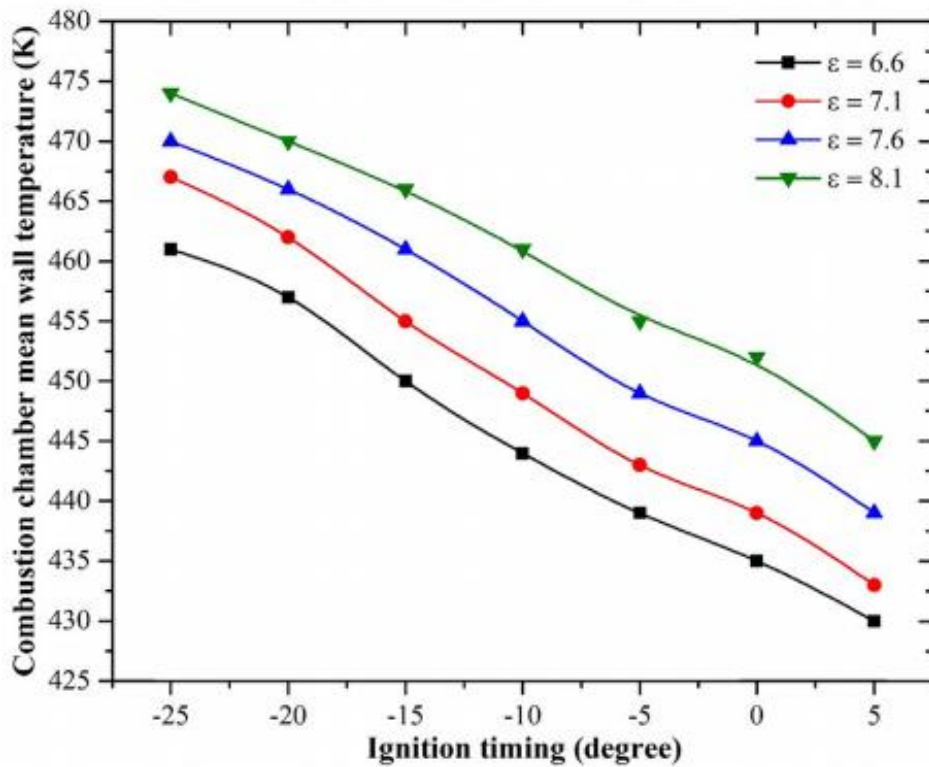


Рисунок 5 – Изменение средней температуры стенки камеры сгорания при изменении времени зажигания и степени сжатия

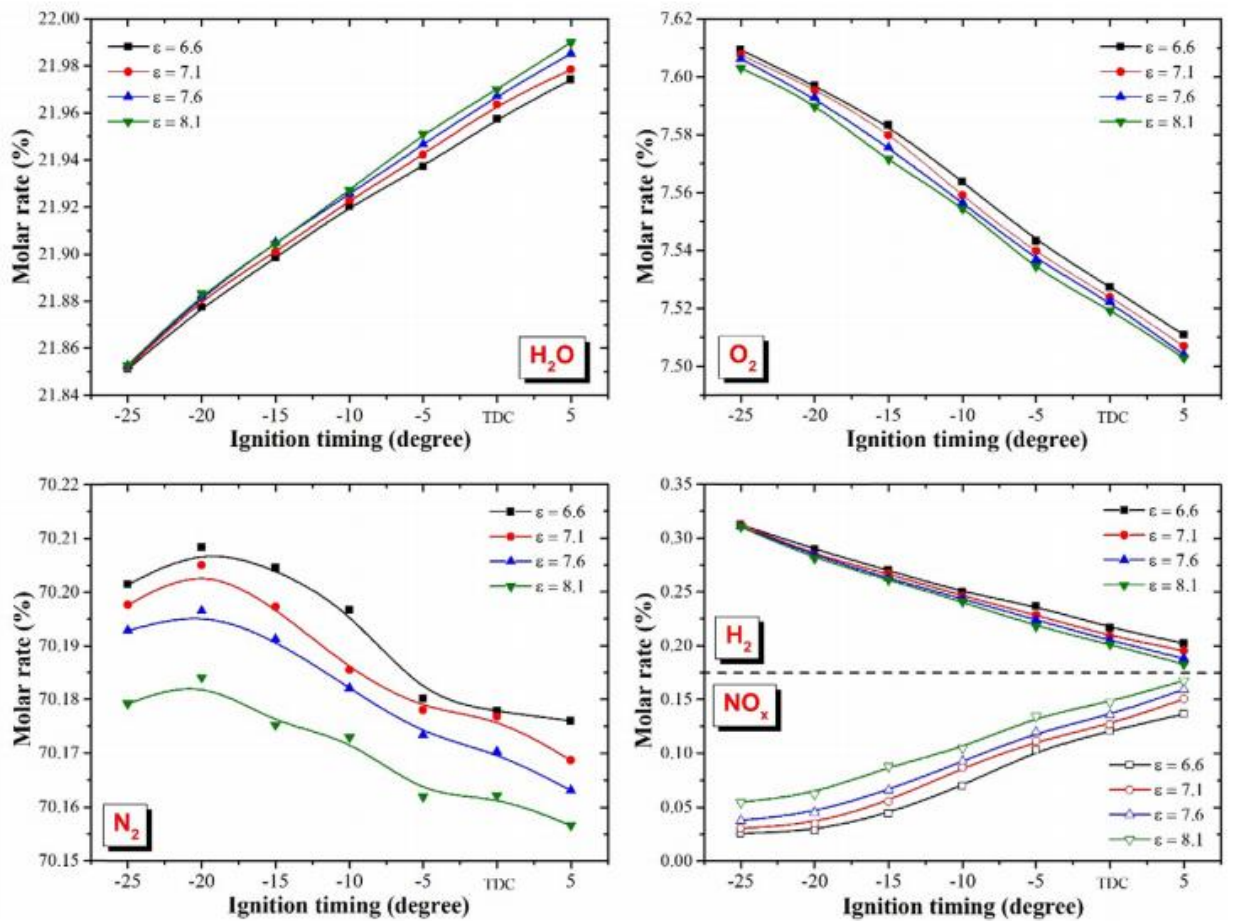


Рисунок 6 – Изменение молярной скорости водяного пара, кислорода, азота, кислорода, водорода и оксида азота в выхлопных газах с учетом времени зажигания и степени сжатия.

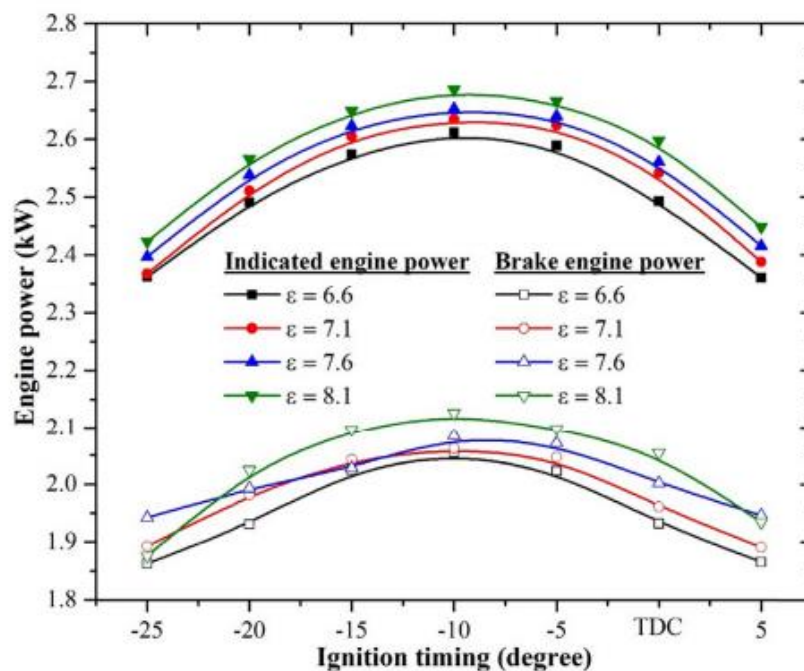


Рисунок 7 – Указанная мощность и изменение мощности с учетом времени зажигания и степени сжатия.

В ходе исследования двигатель работал в семи различных режимах зажигания и четырех коэффициентах сжатия. Таким образом, энергетическая и эксергетическая производительность двигателя может быть охарактеризована в зависимости от времени зажигания и степени сжатия.

Экспериментальное исследование показывает, что увеличение степени сжатия на 1,5% дает максимальное увеличение давления в цилиндре, примерно на 250кПа. Указанная эксергетическая эффективность достигает максимума при значении времени зажигания в 10 бTDC и достигает минимума при 25 бTDC. Оптимальное значение угла опережения зажигания находится в 10 ВМТ. Увеличения степени сжатия положительно сказывается на тепловом и эксергетическом КПД двигателя. Для усовершенствования двигателя с точки зрения эксергии авторы предлагают оптимизировать время зажигания. В качестве будущего исследования авторы рассматривают проведение термо-экономических и экологических анализов двигателя, работающего на водородном топливе при различных степенях сжатия и условиях синхронизации зажигания.

Химическая энергия, запасенная в водороде, должна быть преобразована в кинетическую энергию. Эффективность этого процесса оказывает огромное влияние на дальность действия автомобиля, а также на затраты на топливо. Далее будет обсуждаться водородный двигатель внутреннего сгорания, а также водородный топливный элемент. Водородный двигатель внутреннего сгорания преобразует химическую энергию водорода в механическую энергию и тепло путем слияния водорода с кислородом с образованием воды. Теоретически водород может использоваться как в Отто, так и в дизельном двигателе из-за его предела воспламеняемости, достигающего от 4 до 75% по объему воздуха. Однако на практике высокая температура самовоспламенения водорода (858К) препятствует использованию водорода без использования вспомогательных видов топлива или мер по нагреву в дизельных двигателях. Из-за сопротивления теплопередаче температура, необходимая для самовоспламенения, должна

была бы достигать 1100 К. Это потребовало бы чрезвычайно высоких коэффициентов сжатия, которые невозможно достичь. Поэтому исследователи приняли другой подход и заменили часть дизельного топлива в обычных двигателях водородом. В то время как дизельное топливо воспламеняет смесь при более низких температурах, замещенный водород снижает общие выбросы. При высоких нагрузках двигателя это не оказывает негативного влияния на тепловую эффективность тормоза (БТЭ), в то время как при низких и средних нагрузках двигателя БТЭ снижается. Было показано, что рециркуляция выхлопных газов значительно снижает выбросы оксидов азота двухтопливными водородными двигателями, которые являются большой проблемой для любого двигателя, работающего при высоких температурах. Хотя было показано, что можно использовать водород в процессе сгорания дизельного топлива самостоятельно, используя либо воздух, предварительно нагретый до 200 ° С, либо свечи накаливания, что приводит к тепловому КПД, варьирующемуся от 32 до 49% в зависимости от нагрузки двигателя, этот подход не был найден в недавних публикациях.

Следовательно, дизельный цикл, в котором топливо должно воспламеняться само по себе при сжатии, не является подходящим вариантом для двигателя, предназначенного для работы исключительно на водороде. Двигатели внутреннего сгорания, работающие исключительно на водороде, использовались в экспериментальных производствах, таких как “BMW Hydrogen 7”, который был основан на двигателе Отто. Эти типы двигателей могут отличаться в зависимости от методов науглероживания; внутренние или внешние. Первый вариант дешевле в реализации, поскольку не требует высоких рабочих давлений. Это происходит в результате того, что воздушно-топливная смесь смешивается вне цилиндра, а затем всасывается, но наличие легковоспламеняющейся воздушно-водородной смеси вне цилиндра сопряжено с риском возникновения вспышек. Последнее требует более высоких рабочих давлений, варьирующихся от 10 до 50 бар, что

обеспечивает плотность мощности, которая даже превышает плотность бензиновых двигателей на 15%. Для обеих концепций концентрация оксида азота может быть снижена либо с помощью высоких коэффициентов расхода топлива в воздухе, либо с помощью рециркуляции выхлопных газов. Моделирование показало, что эффективность шестицилиндрового двигателя при частичной нагрузке может достигать 44,5%, в то время как сообщения в литературе о фактических испытаниях не превышают 38%. Конечно, это не означает, что моделируемая эффективность не может быть достигнута, просто никакая другая информация еще не была обнаружена.

В последние годы было опубликовано несколько обзорных работ и книг, посвященных двигателям внутреннего сгорания на водороде. Выводы лишь незначительно различаются между разными авторами. С точки зрения экономии можно сказать, что разрывная тепловая эффективность водородного двигателя внутреннего сгорания в настоящее время находится между эффективностью бензинового и дизельного двигателей или даже достигает последней в экспериментальных установках. Поскольку водородный двигатель внутреннего сгорания имеет те же физические границы, что и другие двигатели внутреннего сгорания, он также ограничен эффективностью Карно. Поэтому, даже с учетом технологических усовершенствований, маловероятно, что эффективность превысит 50% в условиях переменной нагрузки. В режиме чистого водорода нет выбросов CO₂ и только следы выбросов углеводородов, вызванных сжиганием смазочного масла. Большой проблемой являются оксиды азота, но эту проблему можно решить с помощью рециркуляции выхлопных газов-процесса, который уже применяется к дизельным двигателям, сталкивающимся с той же проблемой. Текущие проблемы включают обратный огонь из-за локальных горячих точек в топливной камере, которые вызывают обратный огонь и проблемы с синхронизацией зажигания. Исследования сосредоточены на решении этих проблем, например, с помощью лазерного зажигания вместо обычных свечей зажигания.

Поскольку в настоящее время нет массового производства водородных двигателей, их стоимость можно только оценить. Компания, специализирующаяся на водородных двигателях внутреннего сгорания, утверждает, что общая стоимость и вес будут примерно равны стоимости дизельного двигателя. Поскольку основные компоненты очень похожи на компоненты дизельного двигателя, и даже рециркуляция выхлопных газов одинакова, эта оценка кажется разумной. Затраты на среднеразмерный дизельный двигатель внутреннего сгорания, включая трансмиссию, составляют 30 евро/кВт, не включая обработку выхлопных газов. Определение плотности мощности является еще одной проблемой, поскольку не так много данных опубликовано относительно веса современного дизельного двигателя. Honda утверждает, что их модель дизельного двигателя объемом 1,6 литра 2014 года весит 160 кг и может выдавать мощность 88 кВт, что дает ему соотношение мощности к весу 0,55 кВт/кг. Утверждается, что Mercedes OM642 2005 года весит 208 кг при номинальной мощности 173 кВт, что приводит к соотношению мощности к весу 0,83 кВт/кг. В 2011 году двигатель был усовершенствован до мощности 195 кВт, но вес не упоминается. Поскольку было заявлено, что основные компоненты претерпели лишь незначительные изменения, можно предположить, что вес остался прежним, что приводит к соотношению мощности к весу 0,94 кВт/кг. В связи с развитием технологий производства, по словам нескольких экспертов по двигателям, которые были опрошены, это число увеличилось до 1,5 кВт/кг.

Определение долговечности сталкивается с аналогичными проблемами, поскольку имеется очень мало данных. В 2010 году министерство транспорта США провело испытание транспортных средств, испытанных как на дороге, так и на двигателях, испытанных на динамометре в течение 1000ч. Значительного износа обнаружено не было, за исключением клапанов головки блока цилиндров. Анализ материала показал водородное охрупчивание, которое является проблемой, которую можно решить, выбрав

правильные материалы. Компания, специализирующаяся на водородных двигателях, заявляет о долговечности более 700 000 км. В зависимости от профиля вождения это будет составлять от 10 000 ($v = 70$ км/ч) до 20 000 (35 км/ч) часов работы на обычных транспортных средствах.

Водородный топливный элемент преобразует химическую энергию, запасенную в чистом водороде, в электрическую энергию путем слияния водорода с кислородом, образуя таким образом воду. Существуют различные концепции, но одна из них, используемая в приложениях мобильности, — это топливный элемент с протонным обменом водородом (PEMFC), 2021, 2 81 мембрана (PEM). Два электрода, покрытые благородными металлами, такими как платина, которые действуют как катализаторы, разделены мембраной, проницаемой только для ионов водорода. На аноде водород отдает один из своих электронов, чтобы иметь возможность пройти через мембрану, где он воссоединяется со своим электроном и сливается с кислородом, образуя воду. Их основным преимуществом по сравнению с другими концепциями является высокая плотность мощности, а также низкое время реакции при реагировании на изменения нагрузки. Подобно процессу сжигания водорода, термодинамические принципы ограничивают максимальную эффективность. В научном сообществе было много дискуссий и разных мнений. Наиболее вероятным представляется один из недавних подходов Хасели, который привел к теоретическому максимальному КПД 82,7% при 300К, который уменьшается с увеличением температуры. Между 1170 и 1300 К максимальная эффективность самая низкая, со значением 75,7%. На практике топливные элементы достигают КПД от 50 до 70%. Анализ топливных элементов, используемых в Toyota Mirai 2017 года министерством энергетики США, показал, что пиковая эффективность составляет 66% в регионах с низким энергопотреблением и 50% при выходной мощности 100 кВт. Потеря эффективности происходит из-за компрессора, который необходим для обеспечения достаточного количества воздуха при высокой выходной мощности. Он также выявил увеличение расхода топлива на 50% в

ситуациях холодного пуска (-7°C), что было связано с нагревом системы топливных элементов. Плотность мощности составляет 3,1 кВт/л и 2,0 кВт/кг. Деграция топливного элемента PEM была тщательно исследована, и основным механизмом было обнаружено высокое напряжение на катоде во время запуска и выключения, что приводит к коррозии материала носителя каталитического слоя. Этот процесс отвечает за то, что топливные элементы в электромобилях достигают только 3000 ч, что составляет одну десятую часть срока службы, который может быть достигнут при непрерывной работе. Были предложены контрмеры, но они должны быть проверены в практических условиях. Моделирование экономии топлива показало, что деграция приводит к среднему увеличению расхода топлива до 23% в зависимости от профиля вождения. Исследование показало, что в массовом производстве цена за киловатт падает до 50 долларов США (43 евро) за топливный элемент мощностью 80 кВт, если производится 100 000 единиц в год. Затраты также могут быть снижены, если благородные металлы могут быть заменены более дешевыми альтернативами.

В журнале ELSEVIER также рассматривается тематика добавления водорода для улучшения характеристик смеси.

Формулировка и оценка атрибутов, тематическое исследование, были проведены для оценки четырех видов транспорта и определения сектора, который больше всего выигрывает от использования водорода. Эти методы основаны на методологии шести сигм, которая представляет собой математический подход в сочетании с определенными параметрами, которые определяются введением водорода, чтобы определить, какой транспортный сектор лучше всего выигрывает от использования водорода в качестве основного источника топлива. Для проведения анализа с использованием методик шести сигм разработан набор параметров, перечисленных в таблице 5. Они используются для демонстрации результата с помощью математической модели. Анализ вариаций (ANOVA) обеспечивает полезный подход для анализа значимости факторов и терминов, который касается

множественности тестов. Этот метод был первоначально разработан в докладе целевой группы автомобильной промышленности (AIAG) и считается стандартным для отрасли методом. Регрессионный анализ относится к методам подгонки кривых для прогнозирования средней производительности реакции из-за новой комбинации факторов, а также понимания того, какой фактор вызывает изменение средних результатов. Также будет проведено использование регрессии для прогнозирования и выполнения различных тестов гипотез, чтобы определить наилучший сектор транспорта, который будет наиболее выгоден при использовании водорода. Регрессионные методы - это широко используемые методы статистики и методы исследования операций. Регрессионное моделирование актуально в тех случаях, когда данные ответов собираются с помощью рандомизированного эксперимента или если они получены в результате опроса. В рамках подхода к проверке гипотез, связанного с регрессией, оценка регрессионных моделей и их дисперсий является основной задачей. Чтобы использовать ANOVA, матрица массива, полученная из регрессионного анализа, используется для вычисления суммы квадратов регрессии, суммы квадратов ошибки, степеней свободы, среднеквадратичной регрессии и среднеквадратичной ошибки. Результаты, приведенные в таблице 6, получены из значений 1 и 1, соответственно, которые свидетельствуют о важности факторов, причем 1 является низким, а 1-высоким. Эти значения получены на основе методов регрессионного анализа, описанных в методиках шести сигм. Эта последовательность основана на методе дробного факторного массива, а не на Т-тесте с двумя выборками. Переменные представленные в матрице на рисунке 8 включают степени свободы (DF), стандартную выборку (SS), среднюю выборку (MS), сумму выборок (F) и погрешность расчета (P). Он также показывает пример расчета для одного сектора транспорта. Аналогично, наборы расчетов выполняются и для других видов транспорта. На рисунках 8 и 9 данные дополнительно

оцениваются для получения ошибок, которые повлияют на результаты исследования.

В этом разделе используются методы анализа шести сигм с помощью индексов жесткости и методов регрессионного анализа. Для того чтобы проанализировать, какой транспортный сектор лучше подходит для использования водорода в качестве источника топлива, необходимо определить некоторые параметры. После того, как эти параметры определены, то анализ проводится для различных транспортных секторов в качестве влияющих факторов. Изучаемые параметры приведены в Таблице 5.

Таблица 5 - Параметры и атрибуты, используемые для анализа

Параметры/атрибуты	Параметр
P1	Количество операторов
P2	Коэффициент использования
P3	Устойчивая нагрузка
P4	Географическое распределение
P5	Неважность объема
P6	Важность веса
P7	Контроль за операциями
P8	Общественная тревога
P9	Удельный расход топлива
P10	Стоимость
P11	Воздействие на окружающую среду
P12	Требования к инфраструктуре

Эти параметры являются определяющими факторами результата демонстрации того, какой транспортный сектор больше всего выиграет от использования водорода в качестве основного источника топлива. Перечисленные 12 параметров могут быть проанализированы друг с другом, и рейтинг дается на основе опроса, а также исследования, проведенного путем опроса жителей об их чувствах и представлениях о водороде как

источнике топлива для каждого транспортного сектора. Методы сбора данных были проведены с помощью онлайн-опросов и демонстрации водородных продуктов на Канадской национальной выставке (CNE), где был проведен краткий письменный опрос. В ходе этих обследований были получены данные по двум основным группам; 1 - те, кто выступал против использования водорода; и 2 - те, кто выступает за водород, чтобы помочь уменьшить выбросы парниковых газов, а также зависимость от сырой нефти. Результаты в таблице 6 показывают ранжирование атрибутов для параметров. На рисунке 8 приведена матрица индекса жесткости для локомотивного сектора; аналогично, еще три матрицы сделаны для автомобильного, аэрокосмического и морского секторов. На рисунке 8, используя метод ранжирования атрибутов, эти 12 параметров сравниваются друг с другом с помощью системы ранжирования атрибутов.

Таблица 6- Рейтинг атрибутов (10 - Высокий, 5 - Умеренный, 1 - Низкий)

Атрибуты	Название параметра	Локомотив	Самолет	Морское судно	Автомобиль
P1	Количество операторов	10	5	5	1
P2	Коэффициент использования	10	5	10	10
P3	Устойчивая нагрузка	10	5	5	10
P4	Географическое распределение	10	10	1	5
P5	Неважность объема	10	5	1	10
P6	Важность веса	1	10	1	10
P7	Контроль за операциями	10	10	10	1
P8	Общественное беспокойство	5	10	1	10
P9	Удельный расход топлива	10	10	10	10
P10	Стоимость	10	10	10	10

Продолжение таблицы 6

P11	Экологические последствия	10	5	5	10
P12	Требования к инфраструктуре	10	10	5	10
Всего:		106	95	64	97

Это позволило бы определить влияние каждого параметра друг на друга, поскольку расчеты производятся для случая определения использования водорода, наиболее подходящего для одного из способов транспортировки. Значение «5» - имеет самый высокий уровень важности воздействия, за которым следуют «3», имеющие умеренное воздействие, «1» - имеющий наименьшее воздействие и «0» - представляющий нулевое воздействие. Эти значения используются в соответствии с лучшими практическими методами методик шести сигм. Эти значения получены из опросов и исследований, проведенных жителями Онтарио для их восприятия использования водорода в качестве основного источника топлива для выбранных проектных параметров данного исследования. Значения «1-4» - это результаты матриц индекса жесткости. Они используются для демонстрации временной шкалы и процентной вероятности превращения каждого транспортного сектора в водород. Этот технико-экономический анализ показывает, что необходимо сделать, чтобы уменьшить линию тренда для того, чтобы конкретный сектор стал более осуществимым. Это может быть достигнуто путем дальнейшего информирования общественности о водороде, безопасных методах и параметрах, используемых для этого исследования. Жесткость - это сложность изменений в процессе. Жесткость возрастает, когда степень контроля для достижения изменения уменьшается. Жесткость - это препятствие для гибкости проекта. Она может быть использован в качестве фактора для оценки сложности изменений. Значение «1» показывает кривую индекса жесткости, чтобы использование водорода было применимо к морской промышленности. Эта кривая должна быть

сведена к минимуму. Это может быть достигнуто на основе балльной системы, используемой в параметрическом исследовании в таблице 6 и рассчитанной еще раз на матрице на рисунке 8, чтобы сформировать новый график. Параметры «10», «2», «7» и «12» должны быть сведены к минимуму для достижения более низкого индекса жесткости. Это сделало бы его более выгодным для возможности использования водорода в качестве источника топлива в морской транспортной отрасли. При изменении этих параметров - стоимость, коэффициент использования, способности контролировать работу и удовлетворять требованиям инфраструктуры - водородное топливо может быть использовано в качестве приемлемого чистого альтернативного источника топлива. Можно заметить, что основные параметры на рисунке 12, которые существуют в аэрокосмической промышленности, - это «12», «10», «7» и «9». Аналогично, на рисунке 13, для автомобильной промышленности они составляют «12», «10», «9» и «7», в то время как, как показано на рисунке 1.13 для локомотивной промышленности эти параметры составляют «12», «7», «10» и «4». Параметры «12», «7» и «10» являются наиболее распространенными во всем транспортном секторе. Ссылка на номер параметра приведена в таблице 5. Эти графики индекса жесткости сравниваются для каждого транспортного сектора, как показано на рисунке 6, показанный как общий анализ индекса жесткости в соответствии с параметрами. С помощью «Minitab» было получено уравнение регрессии с 12 параметрами, перечисленными в матрице на рисунке 8.

Parameters	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	Total/55	RI (%)
P1	0	5	3	5	1	1	5	3	1	3	1	5	33	55
P2	5	0	1	5	1	1	5	3	1	3	5	5	35	58.33
P3	3	1	0	1	1	1	3	1	1	3	1	5	21	35
P4	5	5	1	0	1	1	5	3	1	3	5	5	35	58.33
P5	1	1	1	1	0	1	3	3	1	3	3	5	23	38.33
P6	1	1	1	1	1	0	5	3	5	3	1	5	27	45
P7	5	5	3	5	3	5	0	3	3	3	3	5	43	71.67
P8	3	3	1	3	3	3	3	0	1	3	3	5	31	51.67
P9	1	1	1	1	1	5	3	1	0	3	1	5	23	38.33
P10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	5	5	37	61.67
P11	1	5	1	5	3	1	3	3	1	5	0	5	33	55
P12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0	55	91.67
Total/55	33	35	21	35	23	27	43	31	23	37	33	55	396	
RI - %	55	58.33	35.00	58.33	38.33	45.00	71.67	51.67	38.33	61.67	55.00	91.67		

Рисунок 8 - Таблица матрицы индексов жесткости

Source	DF	SS	MS	F	P		B_0	11.98806			
A	1	72.90885	72.90885	896.3192	<0.001	Reject	Has effect	B_1	P1		1.509438
B	1	126.4607	126.4607	1554.669	<0.001	Reject	Has effect	B_2	P2		1.987938
C	1	103.4641	103.4641	1271.956	<0.001	Reject	Has effect	B_3	P3		-1.79813
D	1	30.66228	30.66228	376.9527	<0.001	Reject	Has effect	B_4	P4		0.978875
AB	1	29.92672	29.92672	367.9099	<0.001	Reject	Has effect	B_5	P5	P1,2	0.967063
AC	1	128.4965	128.4965	1579.697	<0.001	Reject	Has effect	B_6	P6	P1,3	-2.00388
AD	1	0.046818	0.046818	0.575566	>0.1	Accept					
BC	1	0.073728	0.073728	0.90639	>0.1	Accept					
BD	1	0.017861	0.017861	0.219572	>0.1	Accept					
CD	1	0.047278	0.047278	0.581223	>0.1	Accept					
ABC	1	78.75125	78.75125	968.1439	<0.001	Reject	Has effect	B_7	P7	1,2,3	1.56875
ABD	1	0.076832	0.076832	0.944549	>0.1	Accept					
BCD	1	0.010153	0.010153	0.124819	>0.1	Accept					
ABCD	1	0.001596	0.001596	0.019622	>0.1	Accept					
Error	16	1.30148	0.081343								
Total	31	572.2461	18.45955								

Рисунок 9 - Анализ дисперсионной матрицы (ANOVA).

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	275.4	45.9	0.19	0.962
Residual error	4	948.4	237.1		
Total	10	1223.8			

Рисунок 10 - Регрессионный анализ дисперсий.

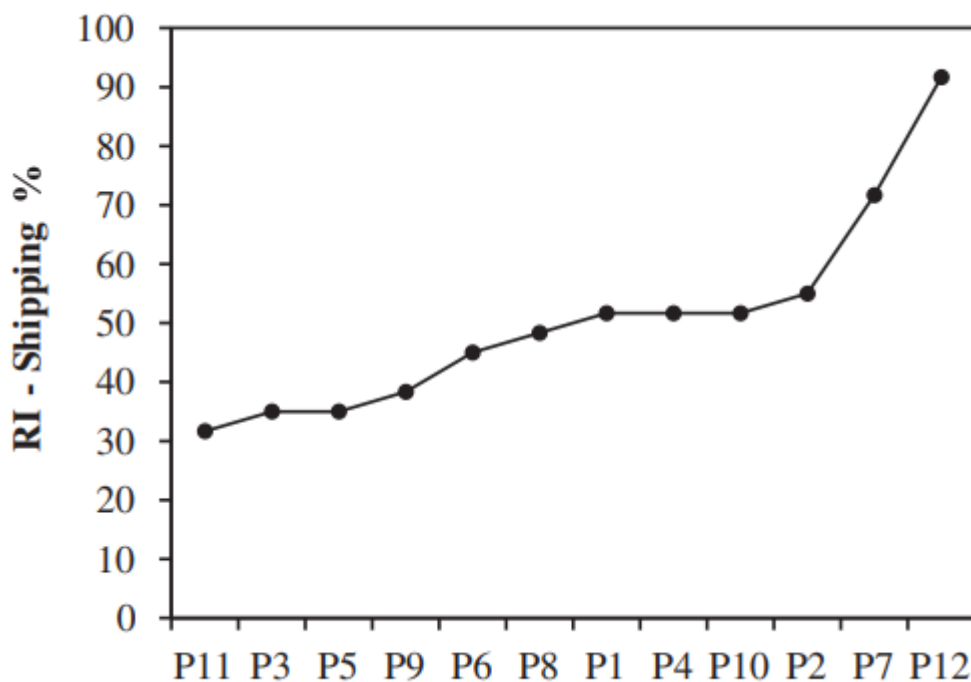


Рисунок 11 - График индекса жесткости для морского сектора

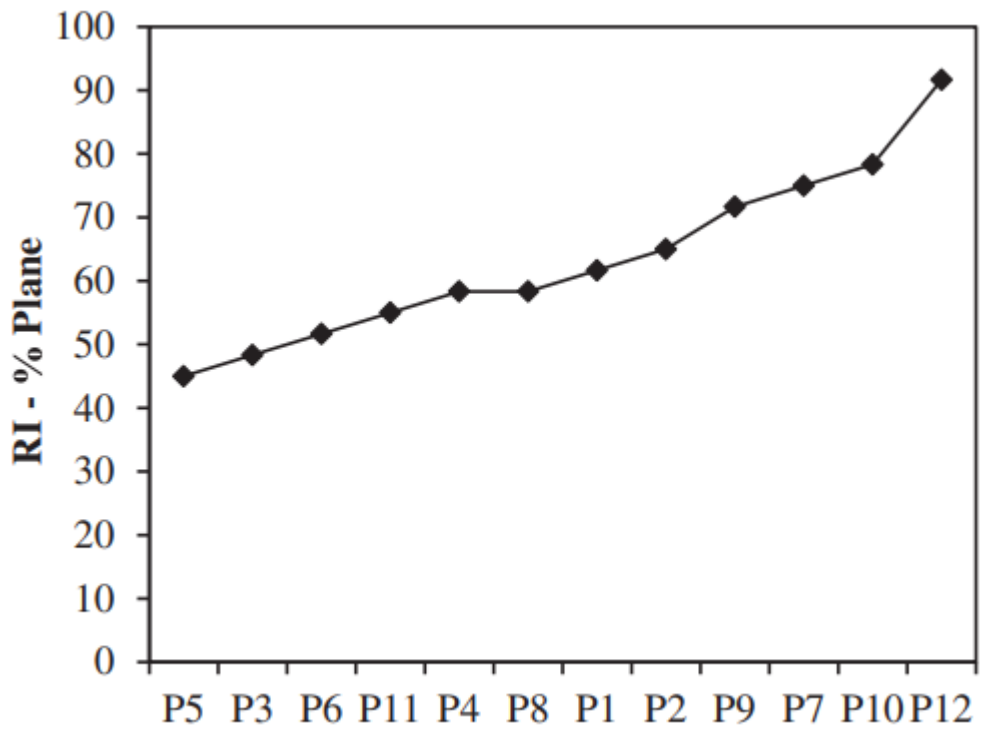


Рисунок 12 - График индекса жесткости для аэрокосмического сектора

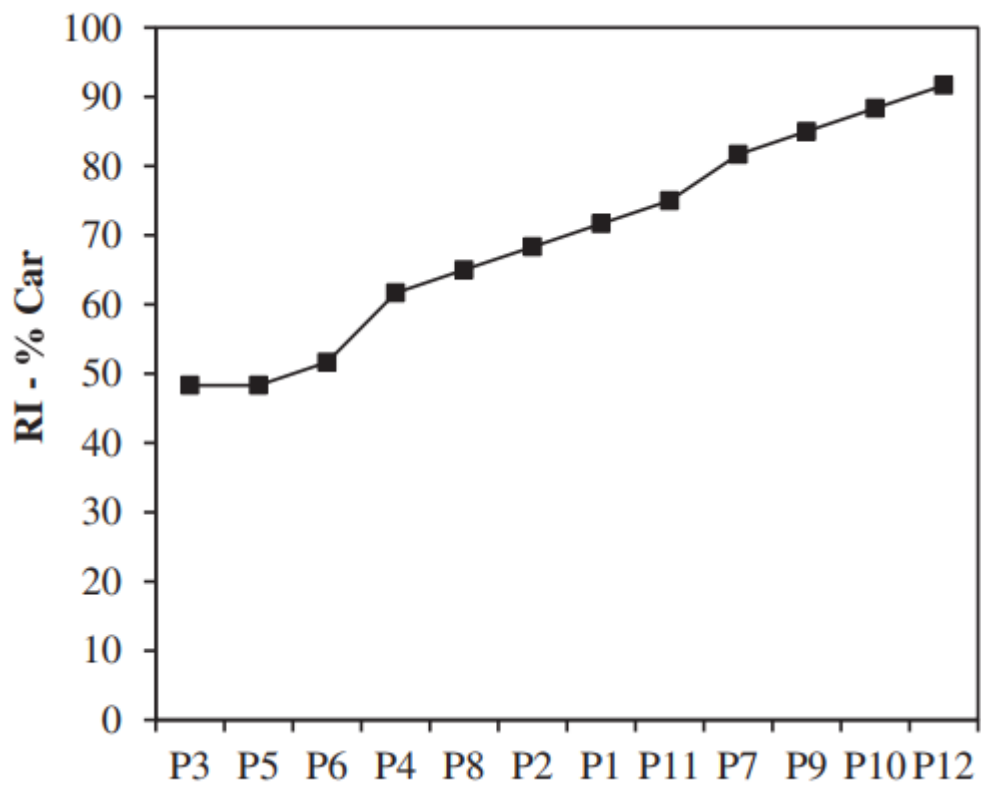


Рисунок 13 - график индекса жесткости для автомобильного сектора

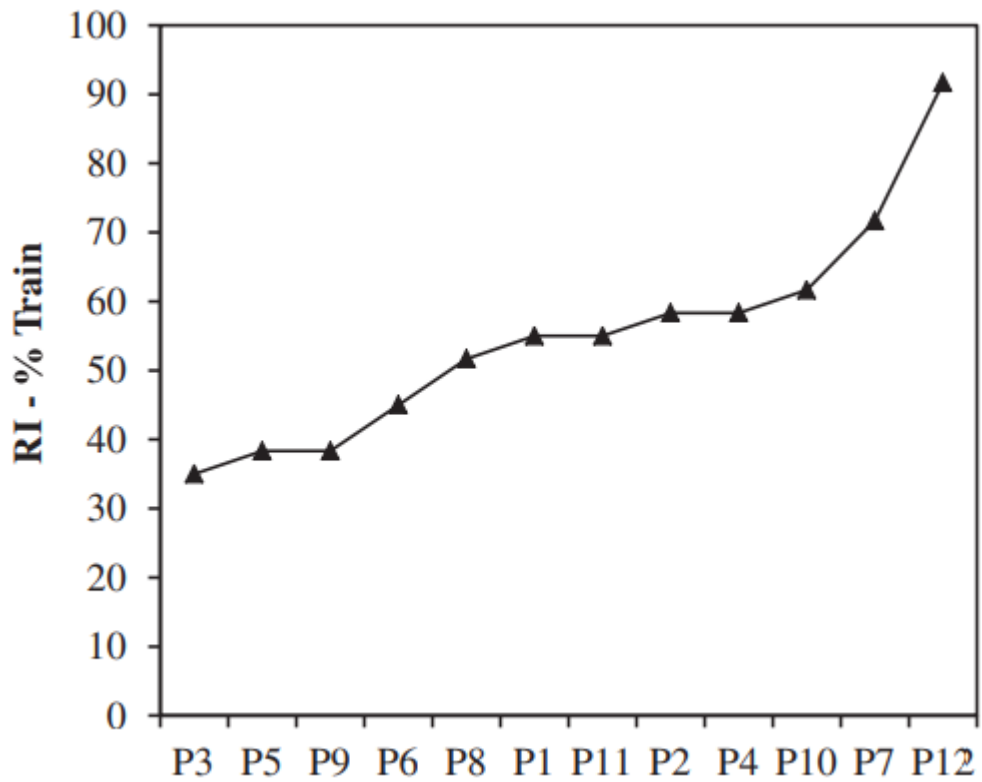


Рисунок 14 - График индекса жесткости для локомотивного сектора

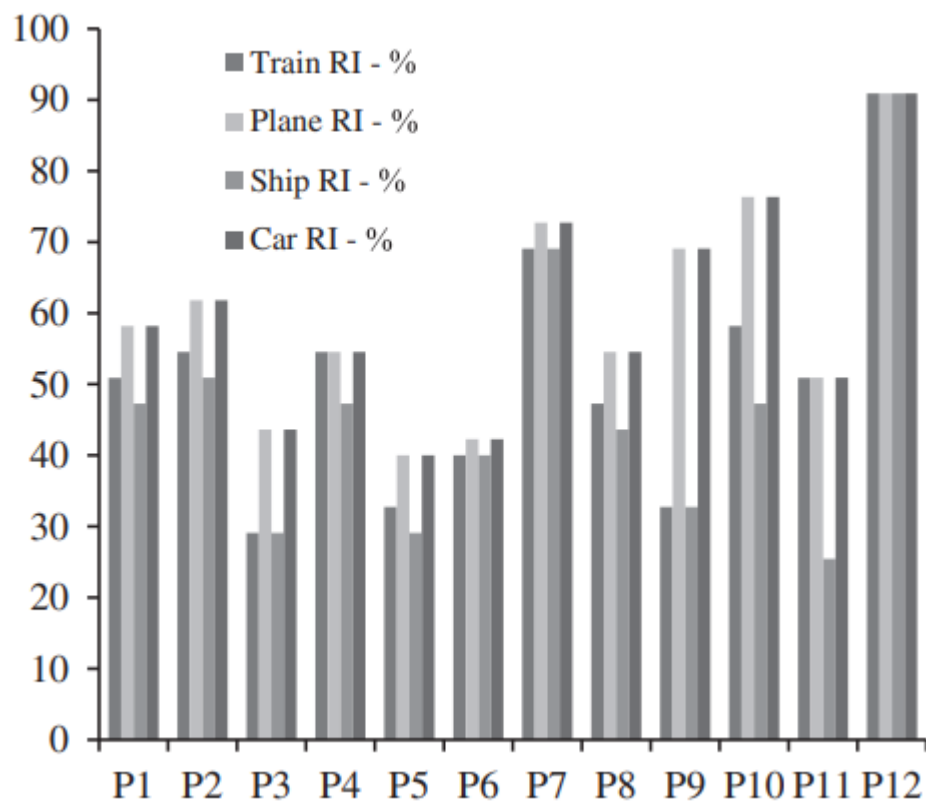


Рисунок 15 - Общий график индекса жесткости для транспортного

Это уравнение помогает принять решение о выборе правильного транспортного сектора, который будет наилучшим образом использовать водород в качестве основного источника топлива. Используя метод ANOVA в «Minitab», было разработано уравнение регрессии, где Y-регрессия, а A, B, C, D, AB и AD-атрибуты. Однако при использовании ANOVA существуют повторяющиеся тесты, которые могут быть помечены как псевдонимы. Эти псевдонимы являются повторяющимися переменными, которые не имеют значения в расчетах, поскольку они повторяются и избыточны, поэтому их можно отбросить, тем самым упростив уравнение. Уравнение регрессии приведено следующим образом:

$$Y=52 + 3,52A + 1,17B - 0,31C + 2,81D - 3,63AB + 1,48AD$$

аналогично для всех четырех случаев. Это может быть использовано для каждого транспортного сектора для определения целесообразности использования водорода в качестве источника. Используя данное уравнение и подставляя параметрические значения из регрессионного анализа в уравнения для морского, локомотивного, автомобильного и аэрокосмического секторов, можно получить общее значение регрессии. Значения варьируются от отрицательных до положительных значений. Таким образом, наибольшая величина является наиболее приемлемым случаем для исследования.

Также в том же журнале была приведена статья с исследованием циклических изменений в бензиновом двигателе, обогащённом водородом.

Тестовый двигатель - 1,6-литровый четырехцилиндровый бензиновый двигатель производства пекинской компании Hyundai Motors. Для выполнения впрыска водорода через порт четыре водородные форсунки, подключенные к водородной магистрали, сначала добавляются во впускные коллекторы под оригинальными бензиновыми форсунками. Кроме того, гибридный электронный блок управления (HECU) разработан для

управления временем искры, временем впрыска и длительностью подачи водорода и бензина, чтобы можно было свободно регулировать фракцию смешивания водорода и глобальное соотношение избытка воздуха в смеси водород-бензин-воздух и опережение искры. Водород, используемый в этом испытании, получают электролизом воды, которая хранится при давлении 16 МПа в баллонах за пределами лаборатории. Когда эксперимент начинается, водород подается в водородный рельс и форсунки при давлении 0,3 МПа после регулирования давления.

На рисунке 16 приведена принципиальная схема экспериментальной системы. Двигатель соединен с вихретоковым динамометром GW160 для регулировки скорости и нагрузки, приложенной к двигателю (отклонение измерения: <1 об / мин в скорости, $<0,28$ Нм в крутящем моменте). Для измерения расхода бензина используется массовый расходомер бензина FC2210 (погрешность измерения: $<0,4$ г/мин). Массовые расходы воздуха и водорода контролируются тепловыми массовыми расходомерами EPI-800 и D07-19BM соответственно (погрешности измерения: $<0,1$ л/мин для воздуха, $<0,02$ л/мин для водорода). Система сбора данных о давлении инцилиндра и анализа горения состоит из оптического энкодера Kistler 2613B, установленного перед кривошипным валом (разрешение угла кривошипа: $0,2$ СА, отклонение измерения $<0,01$ СА), датчика давления в цилиндре Kistler 6117BCD17 со свечой зажигания, размещенной в четвертом цилиндре (неопределенность измерения: $<0,3$ бар), и анализатора сгорания Dewetron. Датчик давления в цилиндре и оптический энкодер подключены к анализатору сгорания Dewetron с помощью экранированных кабелей. Давление в цилиндре и соответствующие сигналы угла поворота кривошипа в течение более 200 последовательных циклов отбираются и обрабатываются с помощью программного обеспечения для анализа горения Dewe-CA.

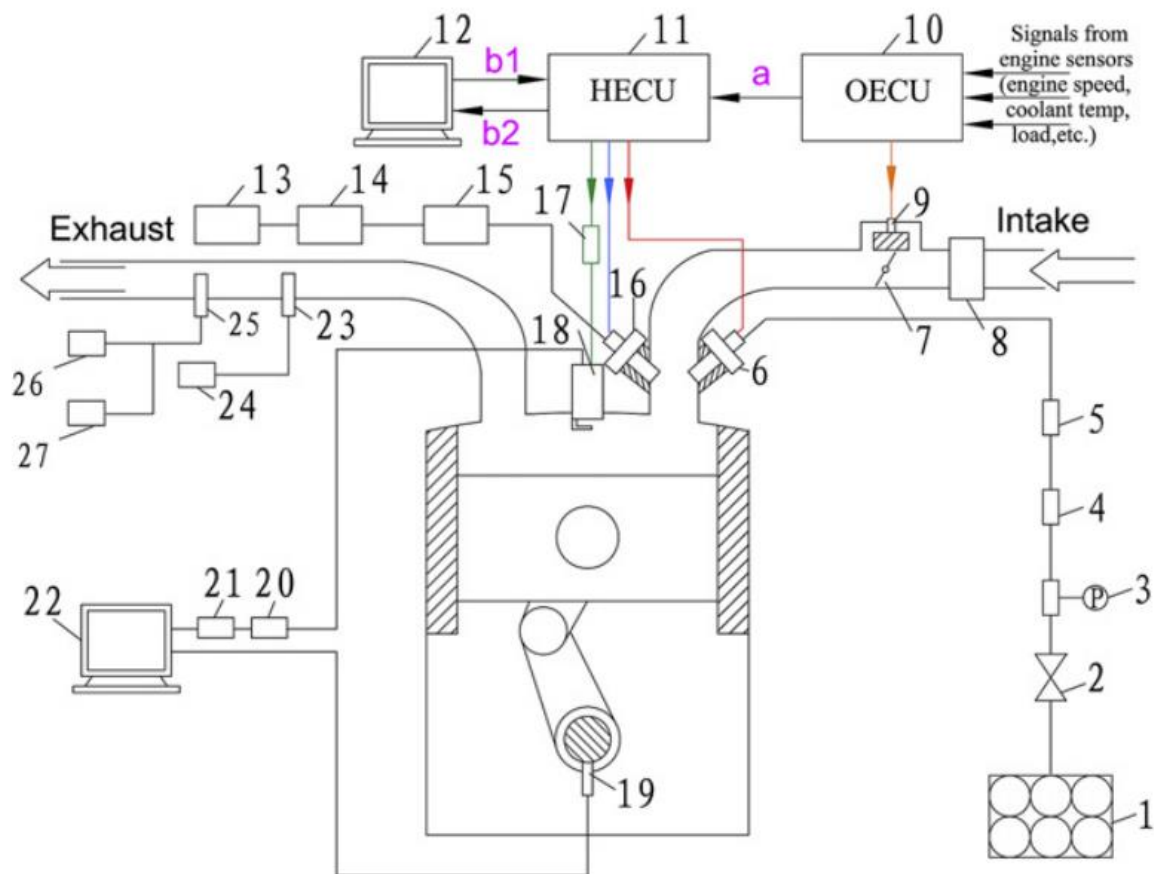


Рисунок 16 - Схема экспериментальной системы 1. Водородный баллон в сборе 2. Клапан регулировки давления водорода 3. Измеритель давления водорода 4. Измеритель массового расхода водорода 5. Ограничитель обратного огня 6. Инжектор водорода 7. Дроссель 8. Расходомер массы воздуха 9. Клапан холостого хода 10. Оригинальный ЭБУ (OECU) 11. Гибридный ЭБУ (HECU) 12. Калибровочный компьютер 13. Топливный бак 14. Расходомер массы топлива 15. Топливный насос 16. Топливная форсунка 17. Модуль зажигания 18. Датчик давления со свечой зажигания 19. Оптический энкодер 20. Усилитель заряда 21. Аналого-цифровой преобразователь 22. Анализатор горения 23. Датчик O₂ 24. Анализатор A/F 25. Труба для отбора проб выбросов 26. Анализатор выбросов MEHA7100D а. Сигналы от OECU к HECU b1. Сигналы калибровки и управления от калибровочного компьютера к HECU b2. Сигналы данных от HECU на калибровочный ПК.

Экспериментальная процедура проводилась так:

Двигатель работал на холостом ходу и типичной скорости движения по городу 1400 об / мин, соответственно. Для всех точек испытания температура охлаждающей жидкости и смазочного масла поддерживалась на уровне 90°С

± 1°C и 95°C ± 1°C соответственно. Бережливое сжигание смеси бензин-водород-воздух было достигнуто за счет надлежащего снижения расхода бензина. Сначала испытания двигателя проводились на холостом ходу и в стехиометрических условиях с тремя объемными долями водорода 0%, 3,23% и 6,52%, а затем были проведены на холостом ходу и в обедненных условиях с двумя объемными долями водорода 0% и 3% и различными коэффициентами избытка воздуха от 1,05 до 1,4. Оригинальный электронный блок управления двигателем (OECU) использовался для управления открытием перепускного клапана холостого хода и моментом зажигания. Частота вращения двигателя на холостом ходу и время зажигания поддерживались на первоначальных значениях 790 об/мин и верхней мертвой точке соответственно. Во-вторых, при стабильном режиме работы двигателя 1400 об/мин и абсолютном давлении во впускных коллекторах (MAP) 61,5 кПа испытания двигателя проводились при четырех объемных долях водорода 0%, 1%, 3% и 4,5% в стехиометрических и чрезвычайно бедных условиях с использованием фиксированного опережения зажигания 22 CA BTDC, а затем завершались при двух объемных долях водорода 0% и 3% и соотношении избытка воздуха 1,20 с различными опережениями зажигания, соответственно. Кроме того, испытания двигателя проводились при различных абсолютных давлениях во впускных коллекторах примерно от 35 до 85 кПа путем увеличения открытия главного дросселя при двух объемных долях водорода 0% и 3% и двух соотношениях избытка воздуха 1,20 и 1,40, соответственно, с использованием максимального тормозного момента (МБТ). Объемная доля водорода a_{H_2} и отношение избытка воздуха λ определяются как:

$$a_{H_2} = V_{H_2} / (V_{H_2} + V_{air})$$

$$\lambda = V_{air} * P_{air} / V_{H_2} * P_{H_2} * AF_{st H_2} + m_{gas} * AF_{st gas}$$

В эквалайзерах. (1) и (2), V_{H_2} и V_{air} - измеренные объемные скорости потока водорода и воздуха при нормальных условиях (L/min), соответственно; P_{air} - плотность воздуха при нормальных условиях (g/L); m_{gas} - измеренный массовый расход бензина (г/мин); $AF_{st,газ}$ и AF_{st,H_2} - стехиометрические отношения воздуха к топливу бензина и водорода ($AF_{st,газ} = 14,6$ и $AF_{st,H_2} = 34,3$) соответственно. В этом эксперименте λ также измерялся А/Ф-анализатором Horiba MEXA110 и датчиком кислорода широкого диапазона. Соотношение атомов Н/С было скорректировано с точки зрения массового расхода бензина и водорода. Отклонение в λ между измеренными и расчетными значениями находилось в пределах 5%. Для всех условий испытаний давление в цилиндре в течение 200 последовательных циклов регистрировалось и анализировалось с помощью программного обеспечения для анализа горения Dewe-SA для получения профилей давления в цилиндре в зависимости от угла кривошипа, периодов развития и распространения пламени в зависимости от a_{H_2} и т.д.

Циклическое изменение на холостом ходу и в стехиометрических условиях:

На рисунке 17 показаны изменения указанного среднего эффективного давления ($I_{\text{мер}}$) с номером цикла при трех объемных долях водорода 0%, 3,23% и 6,52% в холостом и стехиометрическом режимах соответственно. Для каждой фракции добавления водорода коэффициент изменения, указанного среднего эффективного давления ($CoV_{\text{Iмер}}$) рассчитывается с помощью уравнений, приведенных в ссылке. Из рисунка 17 видно, что, поскольку работа сгорания в основном затрачивается на преодоление механических сопротивлений, которые примерно поддерживаются постоянными при заданной частоте вращения холостого хода, температурах охлаждающей жидкости и смазочного масла, $I_{\text{мер}}$ примерно изменяется примерно на 1,35 бар при различных уровнях смешивания водорода в холостых и стехиометрических условиях. Кроме того, рисунок 17 также демонстрирует, что, поскольку низкая энергия воспламенения и высокая скорость пламени водорода способствуют быстрому и полному сгоранию топливовоздушной смеси, $CoV_{\text{Iмер}}$ заметно уменьшается с увеличением доли добавления водорода. Рисунок 18 отображает интегральную долю тепловыделения в зависимости от угла кривошипа для трех объемных долей водорода на холостом ходу и в стехиометрических условиях. Интегральная доля тепловыделения определяется как процент интегрального тепловыделения при заданном угле кривошипа к общему тепловыделению во всем процессе сгорания, который может быть рассчитан с помощью уравнений, приведенных в ссылке. Кроме того, периоды развития пламени (CA_{0-10}) и распространения (CA_{10-90}) также рассчитываются на основе интегральной доли тепловыделения, которая определяется как длительность угла кривошипа от искрового разряда до 10% и от 10% до 90% тепловыделения всего топлива соответственно. Как показано на рисунке 17, и CA_{0-10} , и CA_{10-90} укорачиваются после обогащения водородом. Поскольку при одновременном сжигании топлива в верхней мертвой точке

не будет циклических колебаний, сокращенная продолжительность сгорания позволяет уменьшить циклические колебания двигателя на холостом ходу. Таким образом, CoVimep эффективно снижается с 9,97% для исходного двигателя до 4,93% для бензинового двигателя, смешанного с водородом 6,52%, при холостом ходу и стехиометрических условиях.

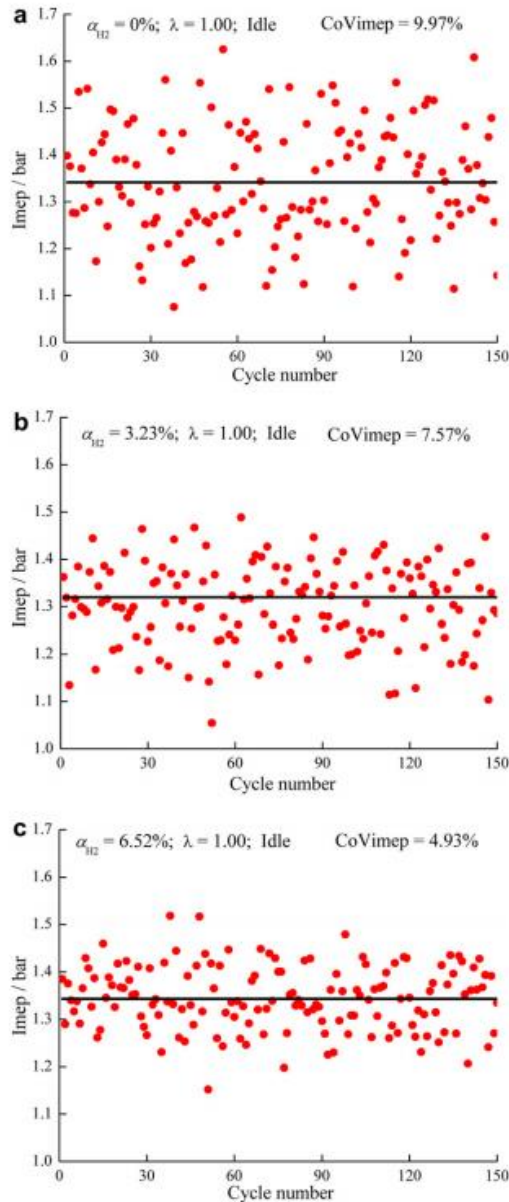


Рисунок 17 - а- I_{mep} в зависимости от номера цикла при $\alpha_{H_2} = 0\%$ на холостом ходу и стехиометрическом состоянии; б- I_{mep} против числа циклов при $\alpha_{H_2} = 3,23\%$ на холостом ходу и в стехиометрическом состоянии; в- I_{mep} против числа циклов при $\alpha_{H_2} = 6,52\%$ на холостом ходу и в стехиометрическом состоянии.

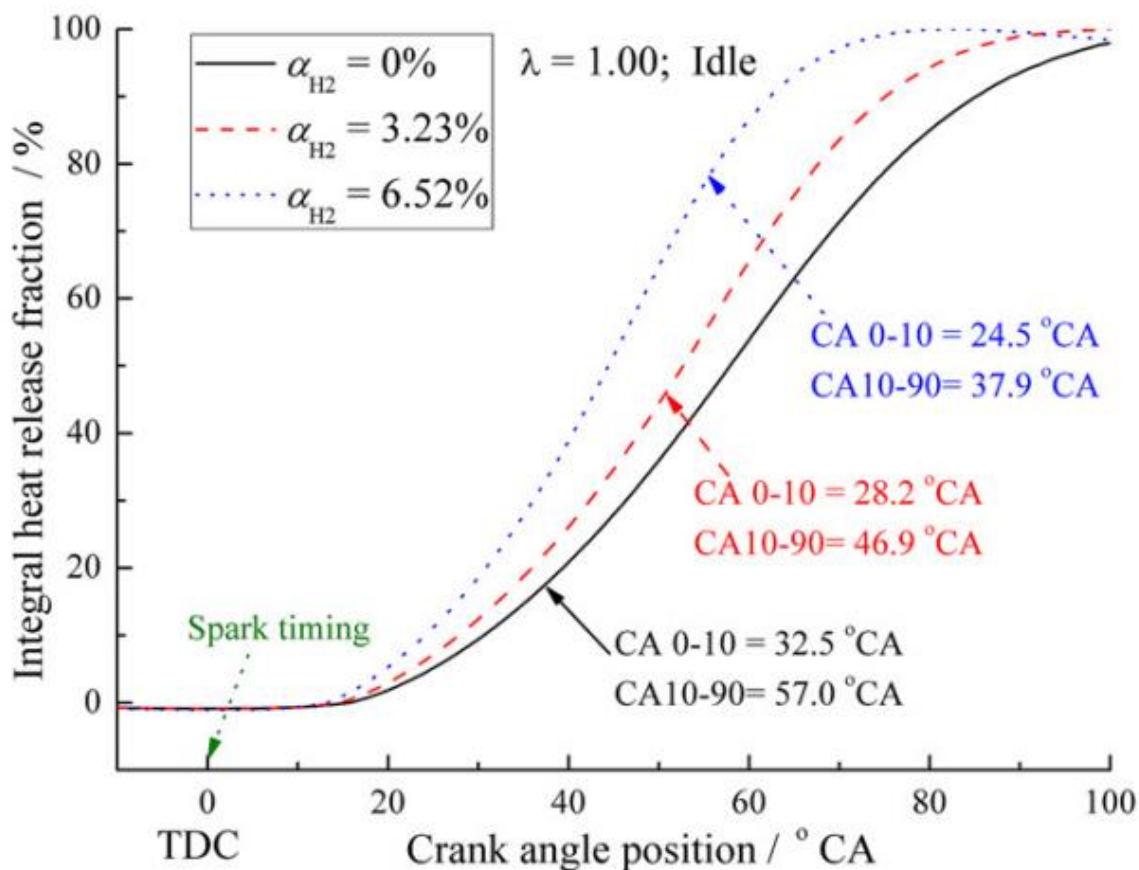


Рисунок 18 - Интегральная доля тепловыделения от угла кривошипа в течение трех (α_{H_2}) на холостом ходу и в стехиометрических условиях.

Циклическое изменение на холостом ходу и с обедненной смесью:

На рисунке 19 показаны вариации CoVimer с отношением избытка воздуха при двух объемных долях водорода 0% и 3% в режиме холостого хода. Также видно, что поскольку пониженная температура сгорания достигается с увеличением коэффициента избытка воздуха, который блокирует быстрое сгорание топливовоздушной смеси, CoVimers как для исходных, так и для 3%-ных двигателей, обогащенных водородом, увеличиваются с увеличением коэффициента избытка воздуха. В то же время CoVimer исходного двигателя увеличивается более резко с увеличением коэффициента избытка воздуха, чем у двигателя, обогащенного водородом. Это происходит потому, что узкая воспламеняемость бензина заставляет оригинальный двигатель страдать от сильного медленного горения и даже осечки на холостом ходу и в худых условиях. Поэтому CoVimer

оригинального двигателя, очевидно, увеличивается с увеличением коэффициента избытка воздуха. Сравнительно, поскольку водород обладает широкой воспламеняемостью, добавление водорода способствует улучшению сгорания двигателя в обедненных условиях. На рисунке 20 показаны вариации периодов развития пламени (CA0-10) и распространения (CA10-90) с числом циклов на холостом ходу и в обедненных условиях. Показывают, что как CA0-10, так и CA10-90 сокращаются после добавления водорода на холостом ходу и в обедненных условиях из-за низкой энергии воспламенения и высокой скорости пламени водорода. Таким образом, поскольку уменьшенная продолжительность сгорания способствует уменьшению циклических колебаний двигателя, CoVimep, очевидно, уменьшается, когда α_{H_2} повышается с 0% до 3% при заданном соотношении избыточного воздуха.

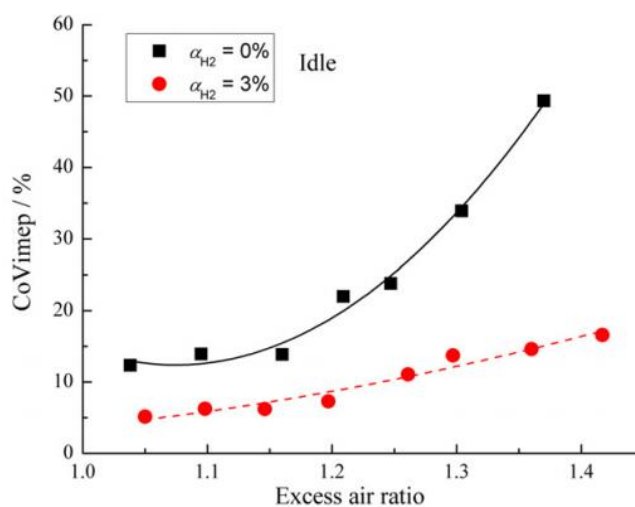


Рисунок 19 - CoVimep против коэффициента избытка воздуха на холостом ходу и в обедненных условиях.

Циклическое изменение при 1400 об/мин и с обедненной смесью:

На рисунке 20 показаны коэффициенты изменения пикового давления в цилиндре ($CoVP_{max}$) и среднего эффективного давления (CoV_{imep}) в зависимости от отношения избытка воздуха при четырех объемных долях водорода 0%, 1,5%, 3% и 4,5% при 1400 об/мин, КАРТА 61,5 кПа и время искры 22 CA BTDC, соответственно. Согласно предыдущим исследованиям, $CoVP_{max}$ также может использоваться для представления циклических изменений двигателя. Однако в этом тесте интересно обнаружить, что вариации $CoVP_{max}$ и CoV_{imep} с коэффициентом избытка воздуха показывают разные тенденции. При заданном соотношении смешивания водорода $CoVP_{max}$ сначала увеличивается, а затем уменьшается, в то время как CoV_{imep} непрерывно повышается с увеличением соотношения избыточного воздуха. Это можно объяснить тем фактом, что на CoV_{imep} влияет весь процесс сгорания, а $CoVP_{max}$ символизируется только пиковым давлением в цилиндре. Когда соотношение избыточного воздуха постепенно увеличивается, из-за снижения температуры и давления сгорания неизбежно возникает увеличенная продолжительность горения смеси в цилиндре, что приводит к довольно медленному горению и даже неполному сгоранию в обедненных условиях. Таким образом, для указанного a_{H_2} CoV_{imep} отчетливо увеличивается с увеличением коэффициента избытка воздуха. Сравнительно, пиковое давление в цилиндре зависит как от сгорания, так и от движения поршня. На рисунке 21 показывается, что при заданной фракции смешивания водорода пиковое давление в цилиндре уменьшается, и соответствующий угол кривошипа для пикового давления в цилиндре сначала замедляется, а затем увеличивается с увеличением коэффициента избытка воздуха. Это явление демонстрирует, что влияние движения поршня на пиковое давление в цилиндре становится более выраженным в экстремально бедных условиях из-за дальнейшего увеличения продолжительности сгорания. Поскольку повышение давления, вызванное движением поршня, более стабильно, чем при сгорании при постоянной

частоте вращения двигателя, $CoVP_{max}$ снова уменьшается при высоких коэффициентах избытка воздуха. Таким образом, $CoVP_{max}$ не является подходящим параметром для отражения циклических изменений двигателя. Как показано на рисунке 20, из-за широкой воспламеняемости водорода предел сжигания топлива в двигателе эффективно увеличивается после добавления водорода. Соответствующий коэффициент избытка воздуха для предела сжигания жира увеличивается с 1,45 до 1,55, 1,97 и 2,55, когда a_{H_2} повышается с 0% до 1%, 3% и 4,5% соответственно. Кроме того, при заданном λ , поскольку высокая скорость диффузии водорода способствует улучшению однородности смеси, что способствует быстрому и полному сгоранию, CoV_{imep} , очевидно, уменьшается с увеличением a_{H_2} .

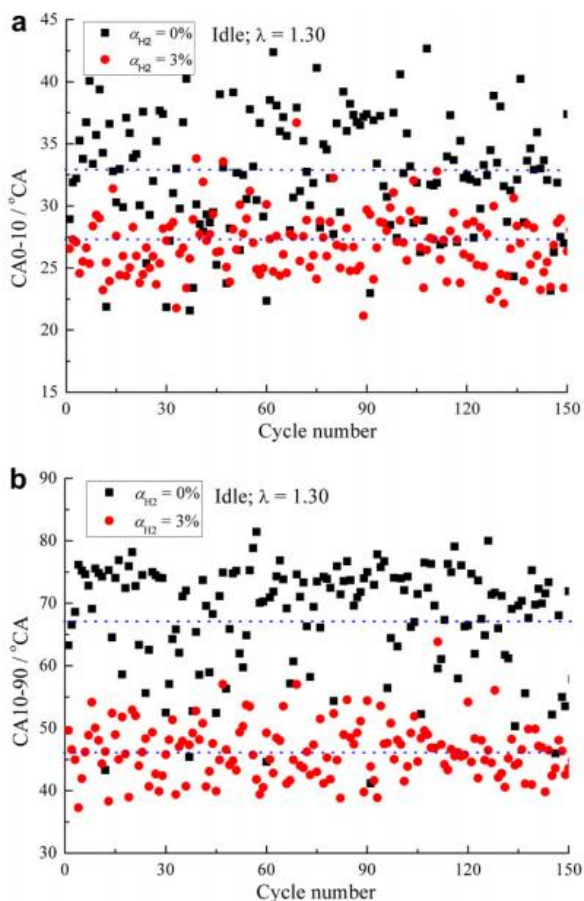


Рисунок 20 – (а) CA0-10 против числа циклов при $\lambda = 1,30$ в условиях холостого хода и обедненной смеси. (б) CA10-90 против номера цикла при $\lambda = 1,30$ в условиях холостого хода и обедненной смеси.

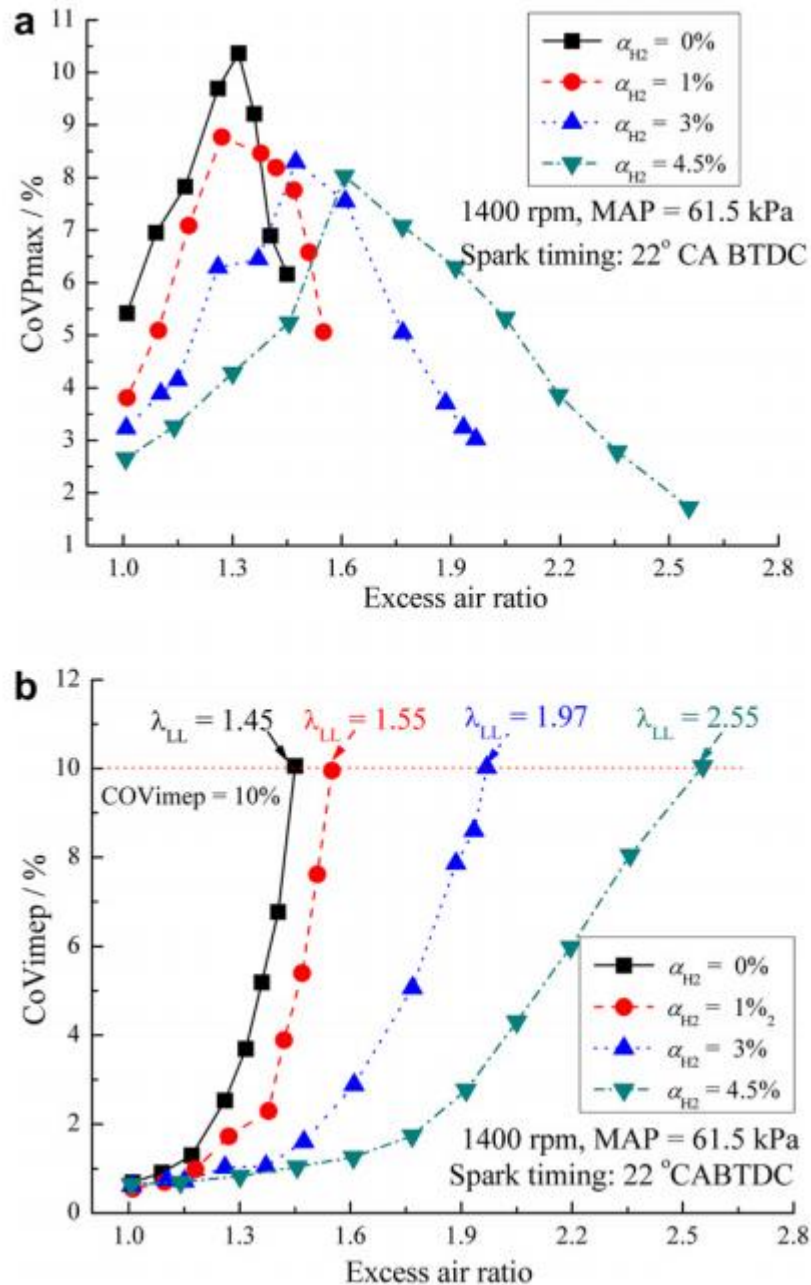


Рисунок 21 – (а) коэффициент $CoVP_{max}$ против избытка воздуха при различных (α_{H_2}) при 1400 об/мин и MAP 61,5 кПа. (b) CoV_{imep} против коэффициента избытка воздуха при различных (α_{H_2})с при 1400 об/мин и MAP 61,5 кПа.

Обогащенный водородом бензиновый двигатель был создан путем добавления системы впрыска водорода через порт и гибридного электронного блока управления к оригинальному бензиновому двигателю. Из экспериментальных результатов можно сделать вывод, что добавление водорода способствует уменьшению циклических колебаний двигателя из-за сокращения продолжительности сгорания после смешивания водорода. Из-за

узкой воспламеняемости бензина CoV_{imer} оригинального двигателя резко повышается с увеличением коэффициента избытка воздуха. Таким образом, двигатель должен заправляться водородно-бензиновыми смесями на холостом ходу и в обедненных условиях, чтобы получить повышенную стабильность работы. Между тем, добавление водорода помогает увеличить предел сжигания топлива в двигателе. При 1400 об/мин, MAP 61,5 кПа и постоянном продвижении искры 22 CA BTDC соответствующий коэффициент избытка воздуха для предела сжигания обедненного топлива увеличивается с 1,45 до 2,55, когда a_{H_2} повышается с 0% до 4,5% соответственно. Таким образом, бензиновый двигатель, смешанный с водородом, может работать с более высоким коэффициентом избытка воздуха, чем бензиновый двигатель, чтобы добиться дальнейшего снижения потерь на охлаждение и выхлопные газы. CoV_{imer} постепенно увеличивается, но $CoV_{P_{\text{max}}}$ сначала увеличивается, а затем уменьшается с увеличением коэффициента избытка воздуха, демонстрируя, что $CoV_{P_{\text{max}}}$ не может быть использован для характеристики циклического изменения в бензиновом двигателе, обогащенном водородом, в обедненных условиях. В целом, добавление водорода можно рассматривать как простой и осуществимый способ для бензинового двигателя получить улучшенную стабильность работы на холостом ходу и в обедненных условиях. Кроме того, необходимы дальнейшие исследования для проверки общих характеристик бензинового двигателя, смешанного с водородом, таких как долговечность двигателя и общая экономическая выгода и т.д.

Глава 2 описание оборудования и проведение экспериментальных исследований

Результаты испытаний топлива в двигателях типа УИТ-85 (рисунок 22) при составе топливовоздушной смеси, приводящем к максимальной детонации, сравнивают с результатами испытаний смесей первичных эталонных топлив и определяют смесь, результаты испытания которой при составе топливовоздушной смеси, приводящей к максимальной детонации, имеют ту же стандартную интенсивность детонации при испытании с той же степенью сжатия. Состав смеси первичного эталонного топлива (по объему) характеризует как его октановое число, так и октановое число образца топлива.

На сегодняшний день в России существует два метода определения детонационных характеристик топлива:

- исследовательский метод, согласно ГОСТ 32339-2013;
- моторный метод, проводится согласно ГОСТ 32340-2013.

При определении октанового числа данными методами, топливо испытывают на специальной одноцилиндровой моторной установке УИТ-85 (ГОСТ 8226-2015, ГОСТ 511-82) с возможностью изменения степени сжатия, сравнивая эталонное топливо с предоставленными на исследование образцами. В качестве эталонного топлива используется смесь двух углеводородов, одним из которых является изооктан (ОЧ равно 100 единицам), а второй – нормальный гептан (ОЧ равно нулю). При смешении данных веществ в определенном процентном соотношении получается топливо с конкретным октановым числом.

Установка для определения октановых чисел бензинов УИТ-85М:

Универсальная установка предназначена для определения октановых чисел бензинов и их компонентов по моторному и исследовательскому методу.

Диапазон определения октановых чисел по обоим методам 40...110. Сущность определения октановых чисел по моторному и исследовательскому методам одина и заключается в сравнении испытуемого образца топлива с эталонами (смесями изооктана с нормальным гептаном) при стандартных условиях испытания. Методы различаются условиями проведения испытания (разные частоты вращения двигателя, углы опережения зажигания, температура топливно-воздушной смеси). Для измерения интенсивности детонации при определении октановых чисел используется электронный детонометр с магнестрикционным датчиком и указателем детонации.

Гарантийный ресурс установки – 2000 моточасов.

Используемая станция охлаждения топлива СОТ-1 в установке УИТ-85М расширяет диапазон возможностей испытания топлив, позволяет проводить проверку бензинов с низкой температурой кипения. Характеристики установки УИТ-85М представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Технические характеристики:

Двигатель	одноцилиндровый четырёхтактный карбюраторный
Диаметр цилиндра, мм	85
Ход поршня, мм	115
Степень сжатия	переменная 4...10
Зажигание	искровое
Смазка	принудительная
Питание топливом	карбюратор
Температура воздуха (исследовательский метод), °С	52 ±0,5 поддерживается автоматически
Температура топливно-воздушной смеси (моторный метод), °С	149 ±0,5 поддерживается автоматически

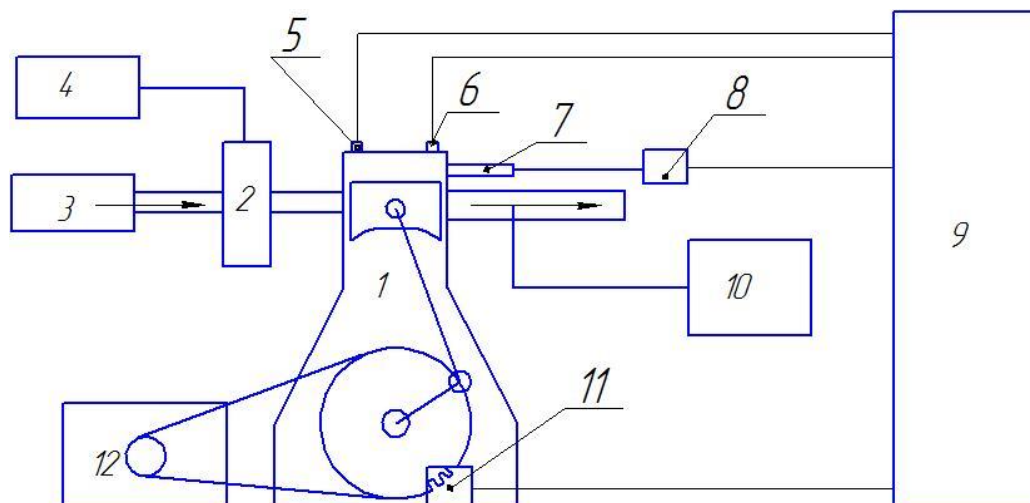
Продолжение таблицы 7

Напряжение электропитания (при частоте переменного тока 50 Гц), В		380
Суммарная мощность, кВт		11
Проверка бензинов с низкой температурой кипения		система СОТ-1
Влажность подаваемого воздуха		система СОТ-1 (кондиционер)
Изменение степени сжатия		мотор-редуктор
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	СОТ-1	630×560×1345
	установки	1500×1700×1500
Масса, кг	СОТ-1	180
	установки	1150



Рисунок 22 – Внешний вид установки УИТ-85

Схема экспериментальной установки на базе УИТ-85 показана на рисунке 23.



1 - одноцилиндровая установка УИТ-85; 2 – карбюратор; 3 - система подачи и измерения расхода воздуха; 4 - система топливоподачи и измерения расхода топлива; 5 - датчик давления в камере сгорания; 6 - датчик ионизации; 7 - свеча зажигания; 8 - система регистрации искрового разряда; 9 - система сбора данных; 10 – газоанализатор; 11 - датчик положения коленчатого вала; 12 - электропровод коленчатого вала.

Рисунок 23 – Схема экспериментальной установки УИТ-85

Система измерения расхода водорода. Подача водорода в УИТ-85 осуществлялась с помощью специальной системы питания водородом. Блок форсунок состоял из двух тарированных объемным методом форсунок по ГОСТ Р 8.736-2011.

ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки влияния водорода на термодинамику рабочего процесса ДВС

Лаборатория состоит из испытательных блоков, включающих динамометры водяного (Фруда) и вихретокового типа, анализаторы выбросов выхлопных газов, приборы учета топлива и вспомогательное оборудование. Динамометр и вспомогательное электрооборудование были откалиброваны за несколько дней до начала испытаний. Чтобы по возможности избежать перепадов температуры и давления, за экспериментами с бензином сразу же последовали эксперименты с водородом с уже разогретым до рабочей температуры двигателем. Сжатый водород при давлении 200 бар из стальных бутылок объемом 50 л был сброшен до 3 бар в регуляторе первой ступени. Топливопровод представляет собой медную трубку, соединенную с расходомером водорода. Регулятор второй ступени подает газообразный водород в смеситель в соответствии с давлением во впускном коллекторе. Схематическое расположение оборудования в автомобиле на водородном топливе представлено на рисунке 24

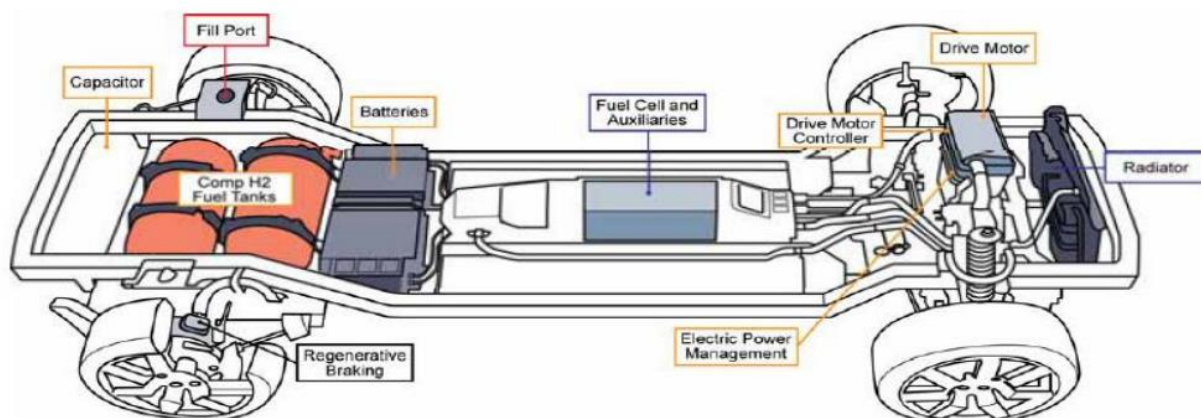


Рисунок 24 - Схематическое расположение автомобиля на водородном топливе

Двигатель соединен с динамометром своей коробкой передач. 4-я передача имеет передаточное отношение 1:1, поэтому частота вращения,

измеренная на динамометре, точно совпадает с частотой вращения двигателя. Помимо самого двигателя, маховик, пусковой двигатель, генератор переменного тока, топливный насос, топливный бак, приборная панель и выхлопная система монтируются на необходимые детали и места. На выходе из выхлопной трубы имеется стандартный глушитель и последний глушитель глушителя. Температура выхлопных газов измерялась между двумя положениями глушителя, и значения выбросов были получены сразу после окончательного заглушения. Принципиальная схема расположения деталей в автомобиле представлена на рисунке 25

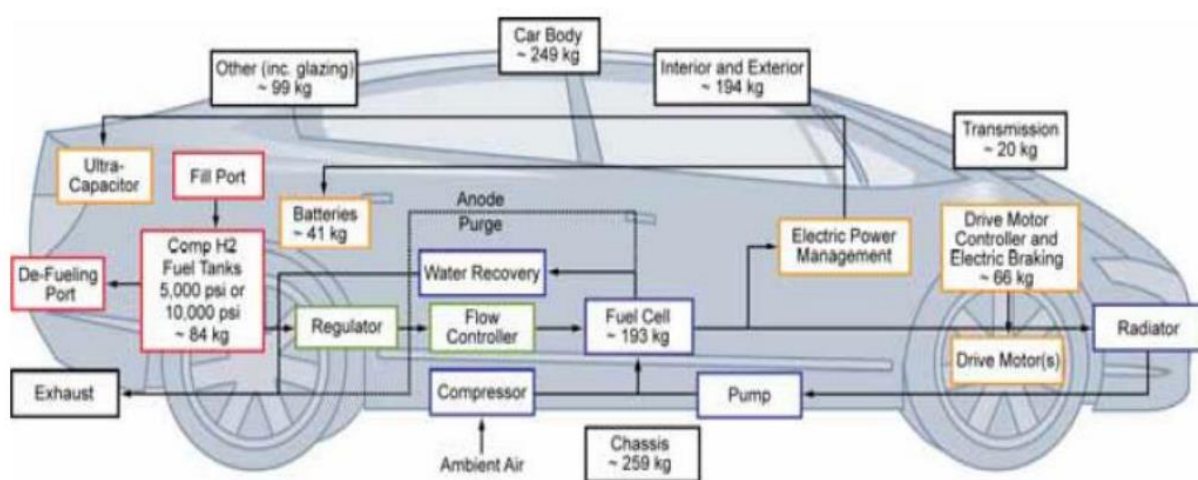


Рисунок 25 - Принципиальная схема расположения деталей

На рисунке 26 показана базовая настройка испытательного стенда. Двигатель соединен своим оригинальным валом с динамометром. Панель управления динамометра расположена на безопасном расстоянии от установки, но легко доступна. Давление и температура окружающей среды, а также частота вращения двигателя и крутящий момент легко считываются с крупногабаритных датчиков. Нагрузка изменяется двумя ручками, которые изменяют ток в статоре вихретокового динамометра. В основном возможны три типа загрузки: постоянная скорость, переменная скорость и их комбинация.

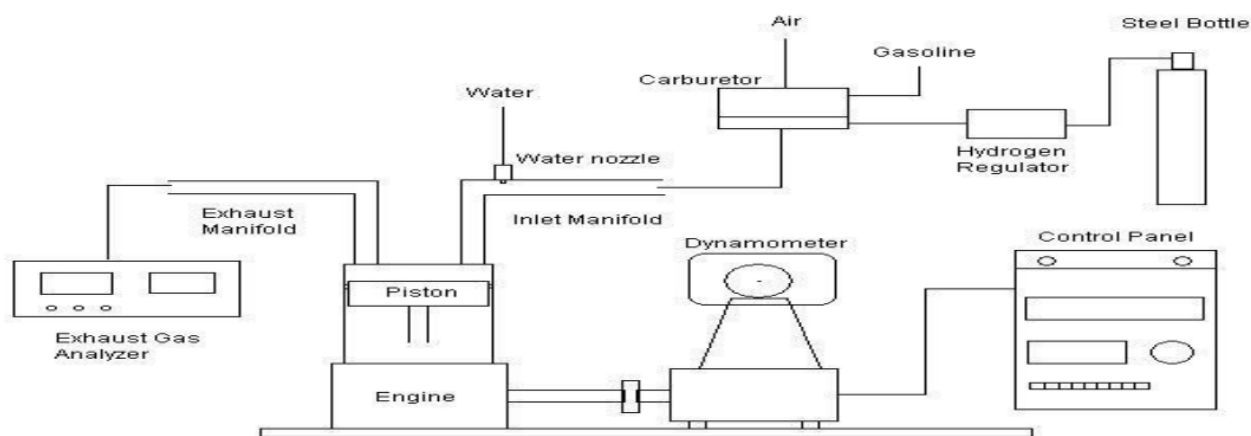


Рисунок 26 - Структурная схема тестовой установки

На приборной панели установлен 3-ходовой переключатель, который позволяет мгновенно переключаться с бензина на водород. Этот переключатель управляет электромагнитными клапанами на бензиновой линии и регулятором водорода. Таким образом, переключение между видами топлива возможно без остановки двигателя. Для адекватного охлаждения установлен дополнительный вентилятор охлаждения, который используется во время сеансов с высокой нагрузкой.

Результаты и анализ:

С целью детального анализа было зафиксировано как можно больше рабочих точек. Было проведено много экспериментов, чтобы избежать неприятных последствий. Сначала смеситель размещался над дроссельной заслонкой на уровне корпуса воздушного фильтра. При такой компоновке склонность двигателя к обратному срабатыванию была значительно высока. По этой причине впоследствии он был помещен между корпусом карбюратора и впускным коллектором. На холостом ходу и без нагрузки не возникало никаких побочных эффектов. При приложении нагрузки практический предел примерно в 20 Нм предотвращал дальнейшую загрузку независимо от того, сколько воды подавалось во впускной коллектор в виде мелкого тумана. При скоростях ниже 2600 об / мин серьезный обратный огонь вызывал внезапную потерю мощности, и поэтому рабочий диапазон

для водорода был установлен между 2600 об / мин и 3800 об / мин (верхний предел обусловлен номинальной скоростью динамометра).

Изменение тормозного момента, которое считывается непосредственно с динамометра, в зависимости от частоты вращения двигателя хорошо видно на рисунке 27. При скорости около 3100 об/мин водород достигает значений крутящего момента для бензина и превышает их на больших скоростях. Поскольку водород обладает характеристиками быстрого горения, ожидается, что он покажет лучшие результаты при работе на высокой скорости. На рисунке 28 показана мощность торможения для обоих видов топлива. На низких скоростях водород теряет мощность, но хорошо конкурирует во втором диапазоне рабочих скоростей (3000 об / мин – 4000 об / мин).

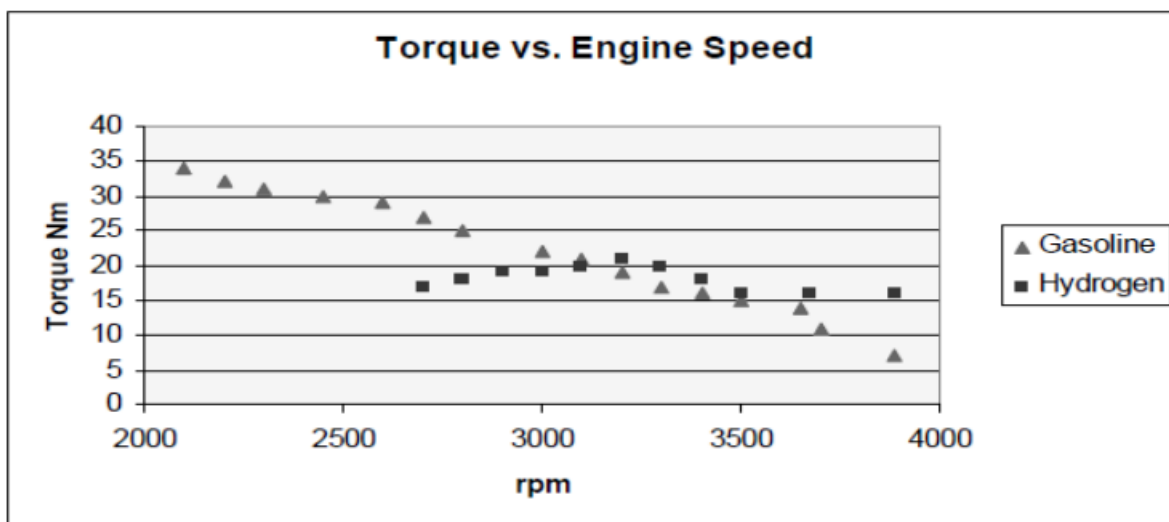


Рисунок 27 - Структурная схема тестовой установки

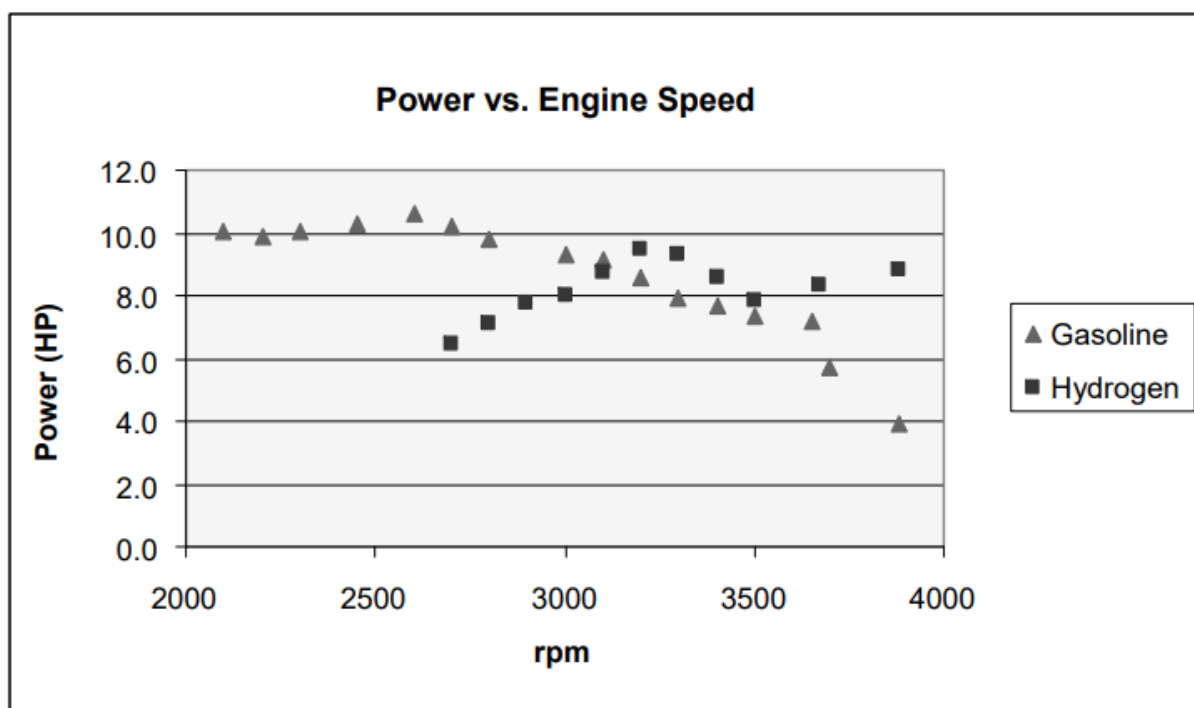


Рисунок 28 - Структурная схема тестовой установки

Из-за низкого содержания энергии в единице объема, внешне смешанный водородный двигатель имеет меньшую мощность, чем обычный бензиновый двигатель. Этот недостаток можно преодолеть с помощью наддува. Таким образом, в цилиндр может быть загружено больше воздуха, а также больше топлива. Это также помогает охладить цилиндр, избегая предварительного воспламенения. Водород имеет широкий диапазон воспламеняемости (4-75%). Определенная неоднородность топливовоздушной смеси не оказывает существенного влияния на ее сгорание. Смесь полностью сгорает, и тепловая эффективность, как правило, выше. При внешнем смесеобразовании неоднородность ниже, чем при внутреннем смесеобразовании. Это также является причиной высокой тенденции к обратному эффекту при применении внешнего смешивания. Через коллектор в цилиндр поступает готовая к горению топливовоздушная смесь. В любой момент эта смесь может воспламениться от горячей точки внутри цилиндра. Сравнение тепловой эффективности тормозов при работе на бензине и водороде показано на рисунке 29. Очевидно, что водород имеет

более высокую тепловую эффективность тормозов. Известно, что бензиновые двигатели демонстрируют свою эффективную эффективность при больших частичных нагрузках, в то время как водород может работать даже при низких частичных нагрузках с большей эффективностью.

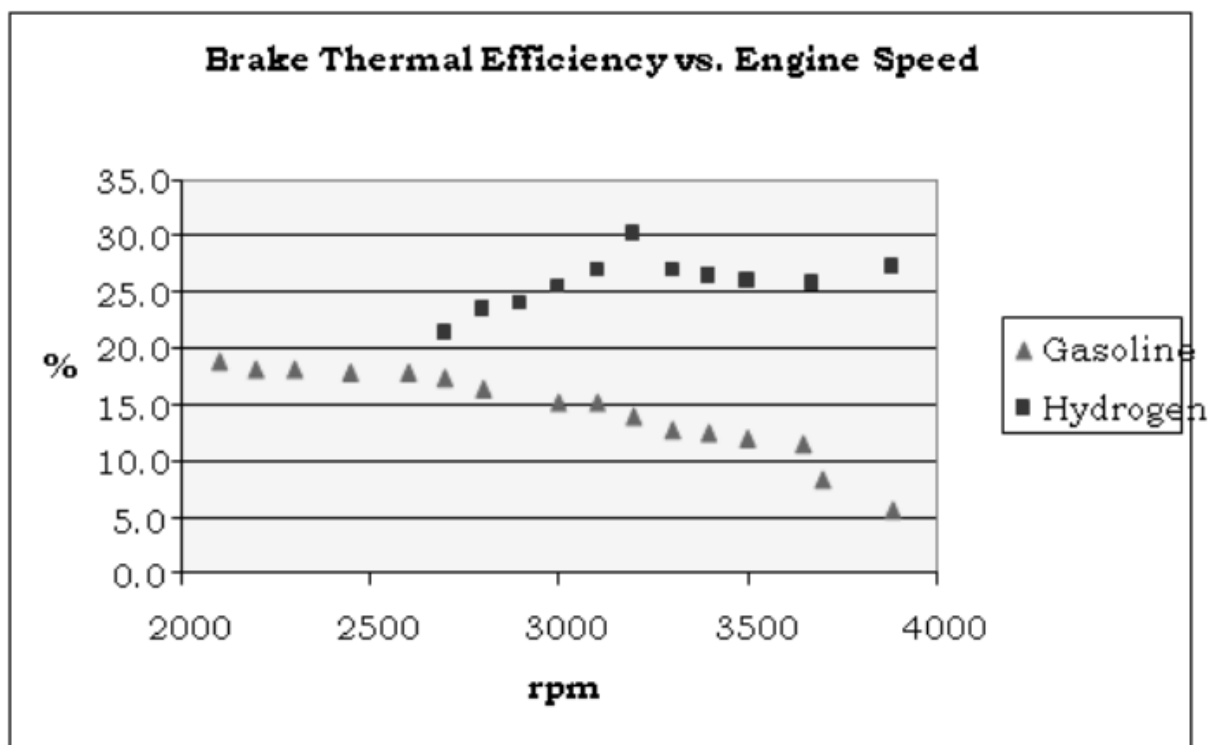


Рисунок 29 - Структурная схема тестовой установки

График другого эксплуатационного параметра, среднего эффективного давления тормоза, показан на рисунке 30. Опять же, при скоростях ниже 3000 об/мин бензиновый двигатель более эффективен. Работа с водородом показывает несколько лучшую эффективность при скоростях выше 3200 об / мин.

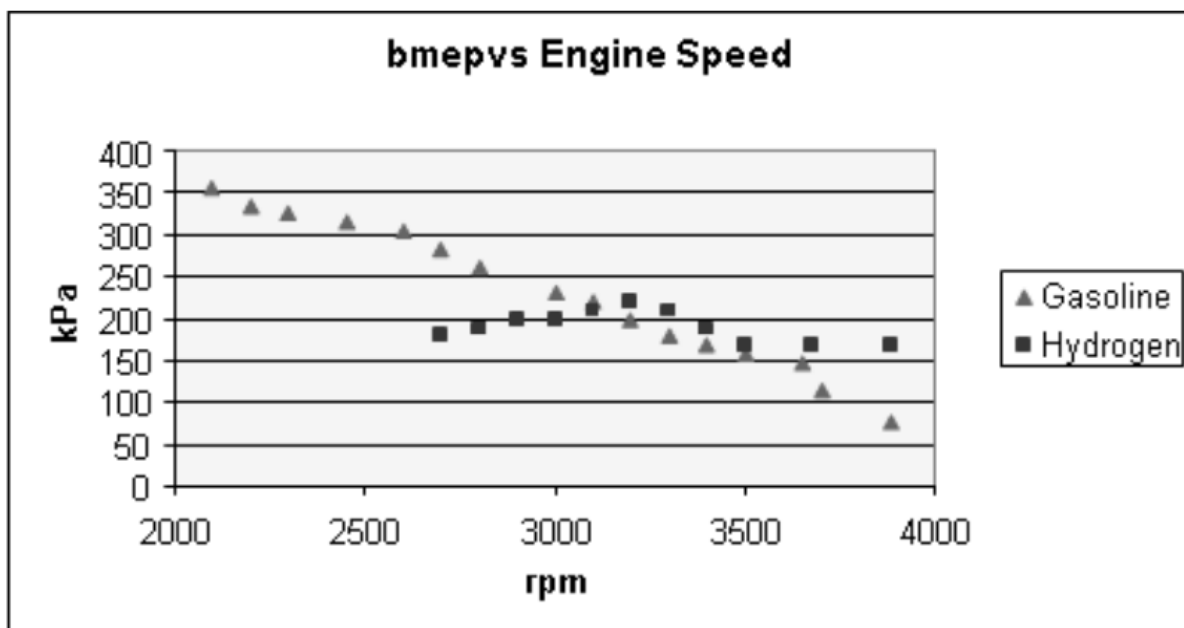


Рисунок 30 - Структурная схема тестовой установки

Анализ температуры выхлопных газов можно провести на рисунке 31. Как только водородный двигатель попадает в диапазон высоких скоростей, температура выхлопных газов начинает значительно повышаться. Наблюдается охлаждающий эффект воды, добавляемой с водородом. Но быстрое горение, которое происходит с повышенной скоростью во время работы с водородом, приводит к повышению температуры.

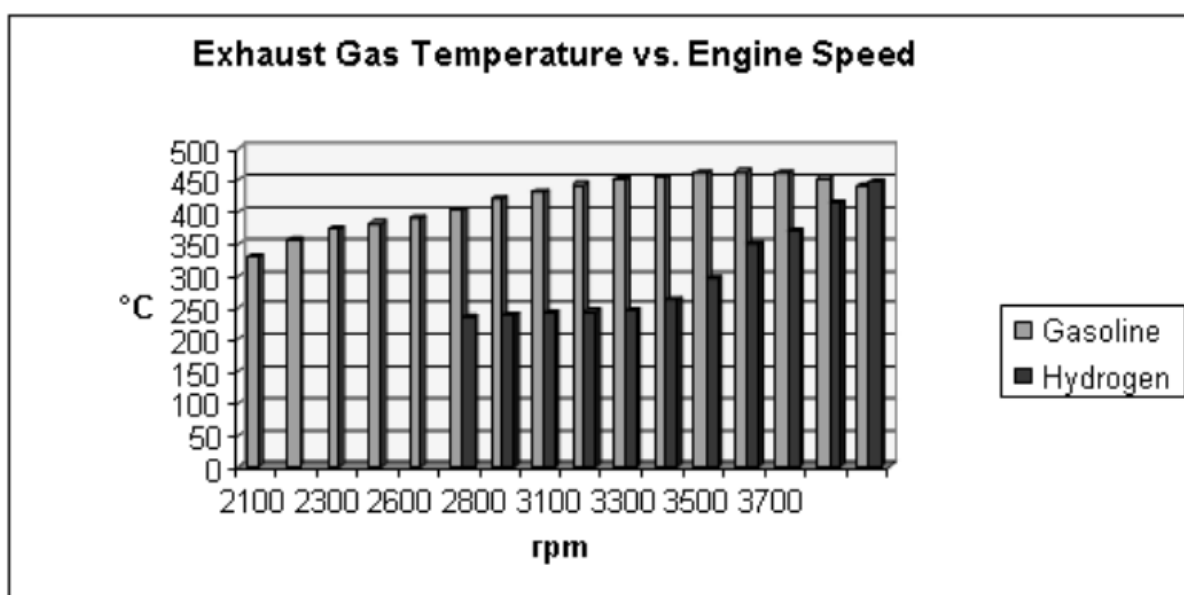


Рисунок 31 - Структурная схема тестовой установки

На рисунке 32 Показаны уровни NO_x обоих двигателей в ppm. Значительное снижение выбросов NO_x наблюдается при работе на водороде. Можно легко отметить почти 10-кратное снижение. Охлаждающий эффект вводимой воды играет важную роль в этом снижении. Кроме того, работа двигателя с бедной смесью обеспечивала низкий уровень выбросов.

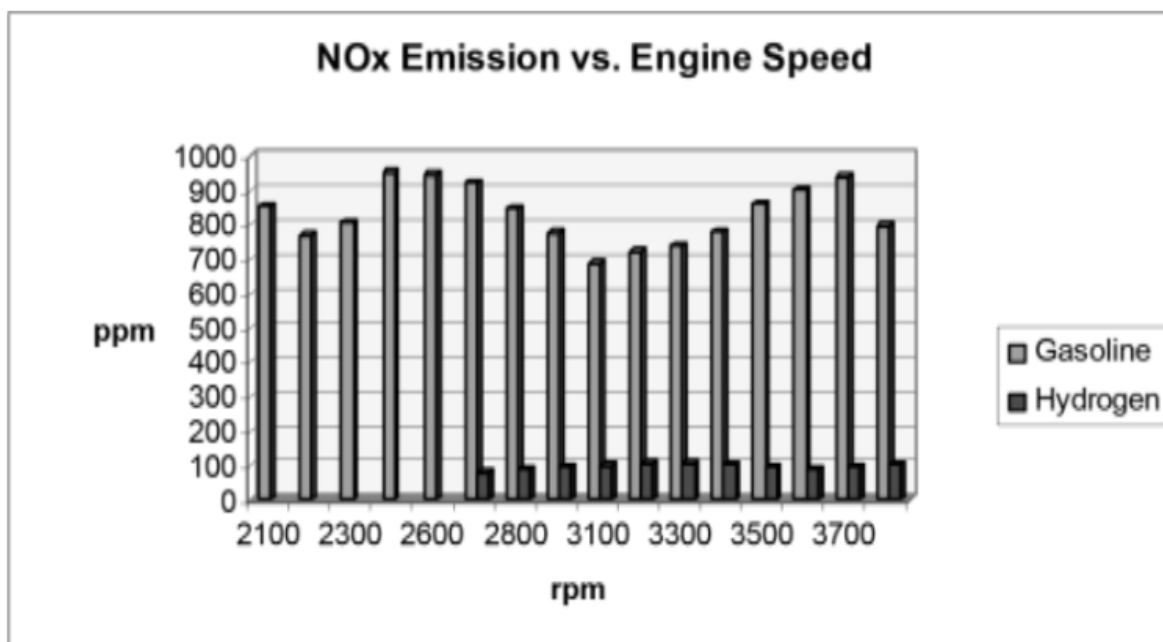


Рисунок 32 - Уровни NO_x в зависимости от частоты вращения двигателя

Хотя в цилиндре содержится больше воздуха, чем требуется для полного сгорания (режим экономии топлива), двигатель не способен сжигать все количество топлива. Выбросы окиси углерода обусловлены неполным сгоранием ископаемого топлива. Ожидается, что водородный двигатель будет иметь нулевые выбросы окиси углерода, поскольку водород является безуглеродным топливом. Как показывают результаты на рисунке 33, некоторое количество монооксида углерода все еще присутствует даже с водородом. Это происходит из-за горения пленки смазочного масла внутри цилиндра. По мере увеличения скорости эти выбросы, как правило, уменьшаются. Аналогичное представление результатов для выбросов углекислого газа приведено на рисунке 34. Для водорода практически нет выбросов, только очень незначительные значения снова из-за сгорания

пленки смазочного масла. Во время горения температура внутри цилиндра чрезвычайно высока. По мере расширения поршня это тепло испаряет определенное количество масла. Наблюдая на рисунке 35, можно предположить вклад испаренной и не полностью сгоревшей нефти в общий объем выбросов. Бензин является углеводородом с длинной цепью и, когда он не полностью сгорает, распадается на углеводороды с короткой цепью. Водород является газообразным топливом и не растворяет масляную пленку на стенках цилиндра. Это еще одно его преимущество по сравнению с обычным топливом. Получаются лучшие смазочные характеристики и более длительный срок службы двигателя. На низких оборотах бензиновый двигатель задыхается, и поэтому в выхлопных газах присутствует больше несгоревших углеводородов. Единственный выброс углеводородов из водородного двигателя происходит из-за вышеупомянутого испарения масляной пленки.

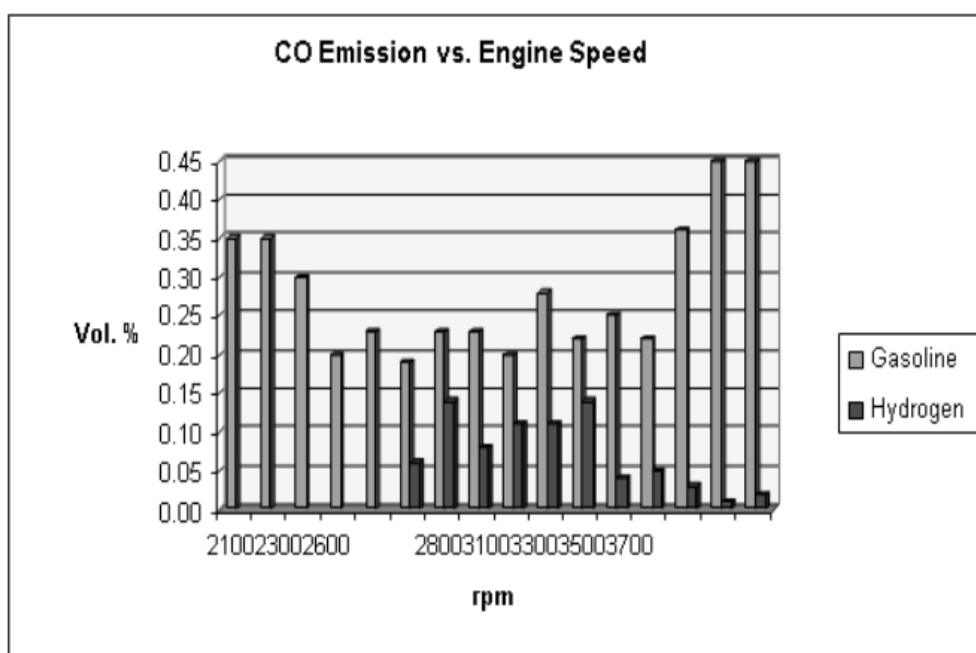


Рисунок 32 - Выбросы окиси углерода

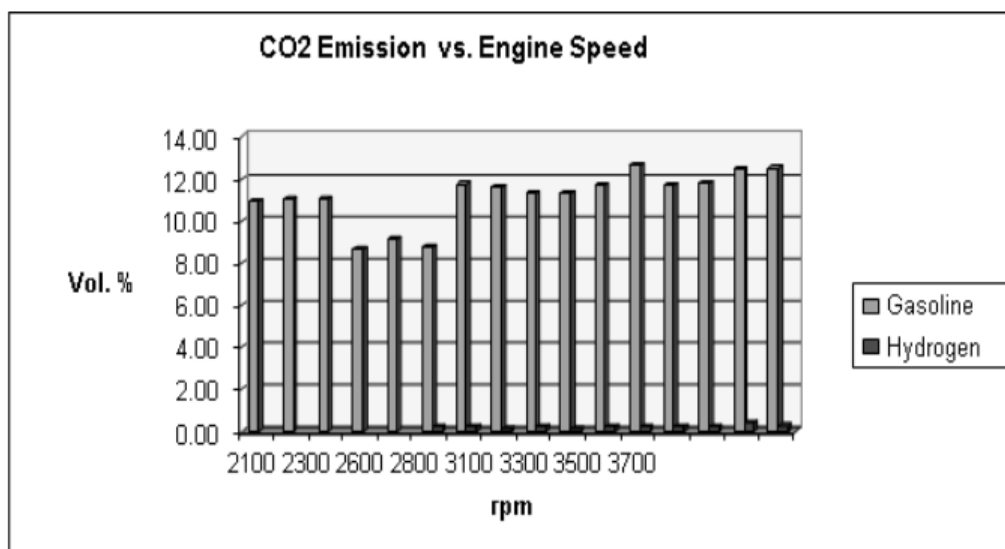


Рисунок 33 Выбросы углекислого газа

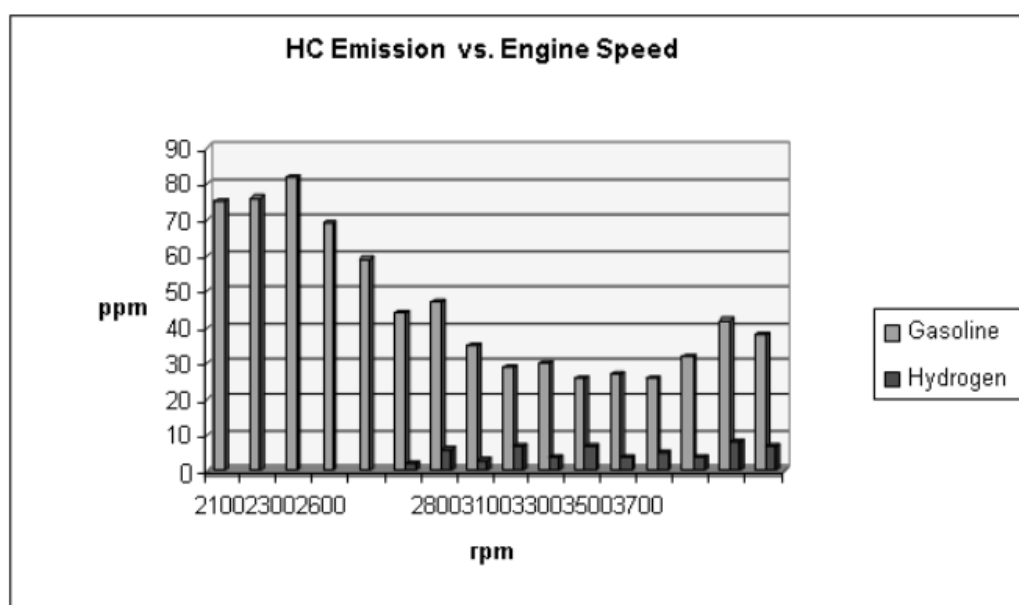


Рисунок 34 Выбросы углеводородов

Поскольку испытания проводились при частичной нагрузке, требовался режим экономии топлива. Специально для того, чтобы охладить цилиндр и безопасно работать с двигателем без обратных срабатываний, в случае работы с водородом смесь подавалась в соответствии с содержанием кислорода в выхлопных газах. На рисунке 35 показаны уровни кислорода в выхлопных газах. Во время работы на водороде двигатель держался на очень худой стороне.

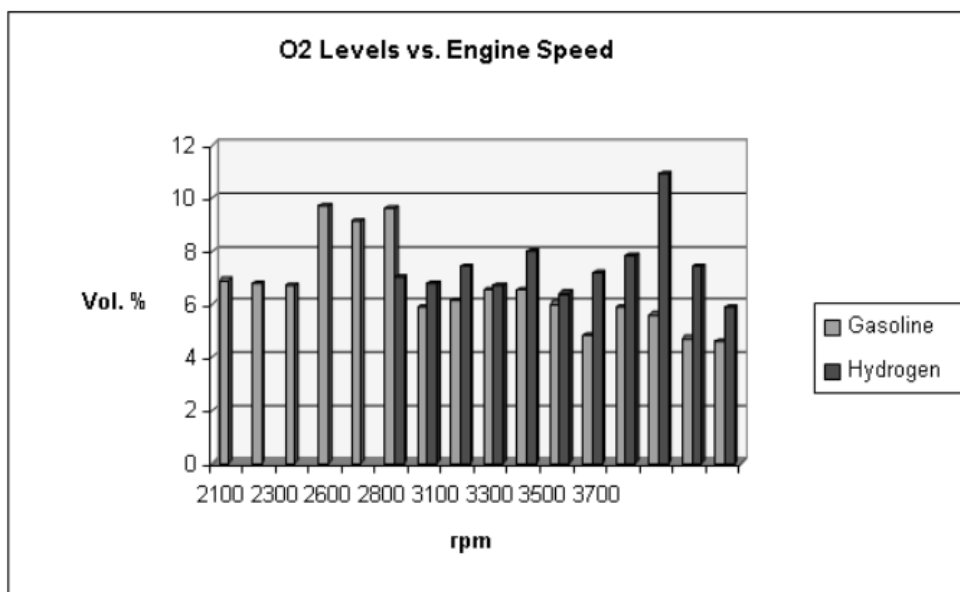


Рисунок 35 - Уровень кислорода в зависимости от частоты вращения двигателя

Обычный 4-цилиндровый двигатель SI был приспособлен для работы на газообразном водороде. Сжатый газ при давлении 200 бар в стальных баллонах подавался в двигатель путем внешнего смешивания. Регулятор первой ступени сбрасывает давление до 3 бар в медную линию подачи газа, где установлен расходомер. Регулятор второй ступени подает водород в смесительный аппарат, установленный на впускном коллекторе. Распылительные форсунки для индукции воды расположены примерно в 4 см от впускных клапанов. Время зажигания было установлено на 10° до ВМТ и зафиксировано. Первые испытания были проведены со смесителем, установленным поверх корпуса карбюратора. Это обычная конфигурация при смешивании пропана. С этой установкой наблюдался серьезный обратный эффект. Затем между корпусом карбюратора и впускным коллектором был установлен еще один смеситель. В этом варианте был предотвращен обратный эффект. В режиме холостого хода двигатель работал безупречно с плавным холостым ходом. При приложении нагрузки и частоте вращения двигателя ниже 2600 об / мин произошел серьезный обратный эффект, вызвавший внезапное падение мощности двигателя. Водяной туман из распылительных форсунок значительно повышает безопасность работы от

обратного огня. Проанализированы особенности использования водорода в качестве моторного топлива. Результаты испытаний показали, что при работе на низких скоростях будут наблюдаться потери мощности, в то время как высокие скоростные характеристики могут конкурировать с бензиновыми характеристиками. Увеличение тепловой эффективности было очевидным. Было доказано, что водород является очень ярким кандидатом в качестве моторного топлива. Выбросы NO_x были примерно в 10 раз ниже, чем при работе на бензине. Как и ожидалось, выбросы CO и HC были почти незначительными. Следы этих выбросов присутствовали из-за испаряющейся и горящей пленки смазочного масла на стенках цилиндра. Свойства горения водорода благоприятствуют условиям быстрого горения, например, в высокоскоростном двигателе. Конструктивные изменения, которые позволили бы двигателю развивать большие скорости, оказали бы благотворное влияние. Соответствующие изменения в камере сгорания вместе с улучшением охлаждения клапанного механизма увеличат возможность использования водорода в более широком рабочем диапазоне. Последовательный впрыск газообразного водорода вместо карбюрации мог бы значительно решить проблему обратного огня. Можно было бы добиться лучшей производительности. Более того, жидкий водород, либо смешанный внутри, либо впрыснутый в коллектор, может быть мерой против обратного огня из-за его экстраординарного охлаждающего эффекта (температура 20 К). Электронный блок управления, который измеряет скорость и изменяет время впрыска вместе с временем зажигания, установленный на двигателе с наддувом, промежуточным охлаждением, высокой степенью сжатия, коротким ходом и высокой скоростью, кажется наиболее подходящим способом получить лучшее от уникальных свойств водорода. Водород обладает потенциалом для обеспечения бесперебойной работы двигателей внутреннего сгорания. Будущие достижения зависят от того, можно ли экономично получить водород в достаточном количестве.

Глава 4 Выявление возможностей повышения эффективности ДВС путем добавления водорода в топливную смесь

Результаты испытаний, представленные на рисунке 36 при движении транспортного средства по городскому циклу движения показали, что за счет дозировки водорода в режимах частичной загрузки двигателя можно заменить до 8% бензина, а в случае дозировки водорода во всей рабочей зоне двигателя - до 17,2%. При этом потребление тепловой энергии сокращается на 2,4 и 5,6% соответственно. В случае вождения автомобиля на постоянных скоростях экономия бензина за счет добавления водорода достигает 11-24%, в зависимости от режимов дозирования водорода и скорости автомобиля. В случае вождения автомобиля с $V_{CONST} = 80$ км / ч и дозировкой водорода в режимах частичной нагрузки наблюдалось увеличение использования общей энергии на 6,8%. Такое ухудшение КПД двигателя объясняется неоптимальным законом управления электромагнитными клапанами, подающими бензин и водород. Когда автомобиль двигался по ГЭС, на 1 литр бензина приходилось 0,18 м³ водорода; исходя из этого, потребность в водороде на одну заправку АЗС (175 литров) составляет 31,5 м³. Определение возможности повышения эффективности процесса горения путем изменения величины установочного угла опережения зажигания 90 и 150 осуществлялось на стенде с динамометрами шасси при моделировании движения автомобиля с $V_{CONST} = 60$ км/ч. По результатам испытаний было отмечено, что увеличение угла опережения зажигания позволяет снизить расход бензина и водорода на 4,9 и 13,0% соответственно. Кроме того, были получены данные представленные на рисунке 37, подтверждающие значительное снижение токсичности (с 17 до 96%) выхлопных газов бензинового двигателя при дозировании водорода в топливовоздушную смесь и увеличении нагрузки.

Table 1. Used energy of fuel mixtures in different modes of movement of the truck ZIL-431410 * [1].

Driving mode	Fuel A-76, MJ	Fuel mixture (A-76 + H ₂)	
		Hydrogen supply in the engine partial load modes, MJ ($M \leq 0.65 M_{\max}$)	Hydrogen supply in the entire engine operating space, MJ
Urban driving cycle	1470.0	1434.0	1387.0
$V_{\text{const}} = 40$ km/h	856.5	816.0	857.6
$V_{\text{const}} = 60$ km/h	1035.5	926.0	974.0
$V_{\text{const}} = 80$ km/h	1268.8	355.2	1120.4

Рисунок 36 - Результаты испытаний при движении транспортного средства по городскому циклу движения**Table 2** Comparison of emissions of toxic components of the internal combustion engine in the dosage of hydrogen compared with the those of the internal combustion engine working on gasoline A-76 * [1]

Load conditions on stand drums P, kgs	Toxicity levels	Degree of change, %	
		$V=15$ km/h	$V=45$ km/h ($\Delta=30$ km/h)
162	CO, %	+82	+78
	CH, ppm	-100	+17
	NO, ppm	+89	+96
	NO _x , ppm	+90	+96
	CO ₂ , %	+41	+43
	CO, %	+86	+75
192 ($\Delta=30$ kgs)	CH, ppm	-14	+20
	NO, ppm	+86	+80
	NO _x , ppm	+83	+80
	CO ₂ , %	+40	+41

+ the advantage of working on H₂; – the advantage of working on gasoline; * Stand test with chassis dynamometers

Рисунок 37 - Сравнение выбросов токсичных компонентов двигателя внутреннего сгорания в дозировке водорода по сравнению с выбросами двигателя внутреннего сгорания, работающего на бензине

Замена газобаллонного оборудования для хранения под давлением 20,0 МПа и системы дозирования водородного топлива или модулей с интерметаллическими соединениями на оборудование, способное производить водород на борту транспортного средства, упрощает конструкцию силовой установки и снижает массу транспортного средства на 250кг. Этим требованиям отвечает способ получения водородной смеси путем ее электрохимической конверсии. Это происходит из-за протекания окислительно-восстановительных реакций на электродах, погруженных в электролит (воду или химический раствор), когда через них проходит

постоянный электрический ток. Кроме того, этот электрохимический процесс сопровождается выделением кислорода O^2 на аноде и водорода H_2 на катоде. Таким образом, на выходе мы получаем газовую смесь в соотношении 2:1, то есть два моля водорода на один моль кислорода. Для обеспечения требуемой производительности (газовыделения) пластины различной полярности собираются в отдельные кассеты и соединяются последовательно с учетом их полярности, покрытия и габаритных размеров. Такой сборкой является электролизер представленный на рисунке 38. Электролитом для него является разбавленная высококонцентрированная щелочь (обычно гидроксид натрия $NaOH$) в водном растворе. Полученный газ из электролизера 5 отводится по соединительной линии в резервуар с электролитом 4 и затем подается на фильтр тонкой очистки 3 (мембрана, поглощающая аэрозольную суспензию электролита). После этого газ поступает во впускной коллектор камеры сгорания двигателя внутреннего сгорания через сопло подачи газа 2.

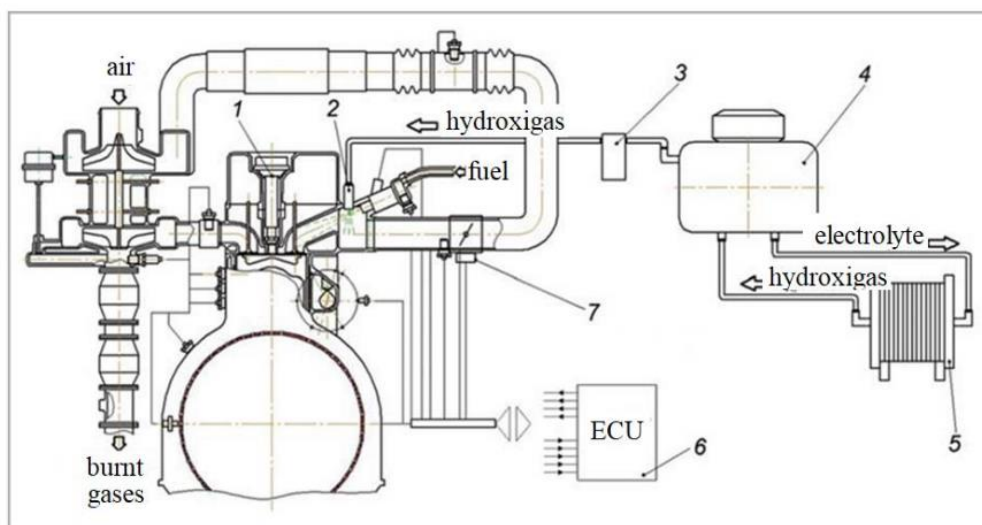


Рисунок 38 - Схема установки электролизера и его компонентов в системе питания двигателя внутреннего сгорания: 1 – модуль зажигания; 2 – штуцер подачи газа во впускной коллектор; 3 – фильтр тонкой очистки газа; 4 – бак с электролитом; 5 – электролизер; 6 – электронный блок управления; 7 – дроссель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены и проанализированы способы и технологии, используемые в автомобильных водородных силовых агрегатах. Одним из наиболее важных аспектов альтернативных видов топлива является их плотность энергии, которая зависит не только от самого топлива, но и от системы хранения. Чем он выше, тем больше диапазон автомобилей. В настоящее время все водородные транспортные средства на рынке используют сжатый водород. Это происходит главным образом потому, что недостатки альтернатив слишком значительны. Жидкий водород должен храниться при очень низких температурах и дегазироваться из-за поступления тепла из окружающей среды. Гидриды металлов имеют очень высокую плотность энергии при работе при более высоких температурах. Однако выделение — водорода-это эндотермическая реакция, которая требует много тепловой энергии. Потенциальным приемником хранилища водорода под давлением являются углеродные наноматериалы. Они имеют более чем в два раза большую плотность энергии, но для поддержания этой плотности энергии в течение, по крайней мере, сотен циклов зарядки требуются более фундаментальные исследования. Для преобразования химической энергии водорода в механическую энергию можно использовать либо водородный топливный элемент в сочетании с электрическим двигателем, либо водородный двигатель внутреннего сгорания. В то время как прежний силовой агрегат имеет более высокий КПД (54 против 41%) и легче (152 против 193 кг), водородный двигатель внутреннего сгорания может быть изготовлен с использованием оборудования из двигателей на ископаемом топливе, поскольку основные компоненты очень похожи. Кроме того, водородный двигатель внутреннего сгорания имеет более длительный ожидаемый срок службы, чем топливный элемент, что приводит к значительно более низким эксплуатационным расходам (0,58 против 2,62 евро/ч). Хотя эти цифры только оцениваются производителями двигателей, независимые испытания водородных двигателей внутреннего сгорания

показали лишь очень незначительный износ. В результате дорогостоящих батарей, используемых в настоящее время, оба водородных концепта дешевле и легче, чем электромобиль (3,91 евро/ч и 326 кг), который, в свою очередь, имеет самый высокий КПД (86%). Еще одним большим недостатком батарей является аспект утилизации, который по-прежнему сталкивается с серьезными проблемами.

Вывод исследования этих технологий трансмиссии заключается в том, что нет четкого решения на будущее. Однако, основываясь на имеющейся сегодня информации, стоит инвестировать больше усилий в исследования водородных технологий. В частности, водородный двигатель внутреннего сгорания может обеспечить переход от автомобилей на ископаемом топливе к двигателям, работающим на возобновляемых источниках энергии. Еще одним важным аспектом альтернативных видов топлива являются варианты дозаправки. В то время как электромобили можно заряжать в течение ночи в доме владельца, в настоящее время эта опция не существует для водородных транспортных средств. Была исследована возможность использования солнечной энергии для мелкомасштабного местного производства водорода. Хотя серьезных технических проблем нет, а солнечные панели действительно обеспечивают дешевую электроэнергию, электролиз и сжатие водорода в небольших масштабах недостаточно эффективны, чтобы конкурировать с водородом, который производится в больших масштабах путем парового риформинга метана. Как только эффективность мелкомасштабного производства водорода и процесса сжатия будет повышена, он может стать экономически жизнеспособным вариантом.

С учетом вышеизложенного можно сделать следующие выводы по использованию водорода в топливных смесях двигателя внутреннего сгорания:

1. Результаты экспериментов на грузовых и легковых автомобилях подтвердили принципиальную возможность сокращения использования жидкого топлива, повышения энергоэффективности двигателя внутреннего

сгорания и снижения токсичности их выхлопных газов в крупном городе за счет частичного добавления водорода в бензиновую смесь. Так, в режиме имитации городского цикла вождения потребление энергии было снижено на 2,4– 5,6%, а бензин заменен на 8-17%. Токсичность выхлопных газов в установившихся условиях в стендовых условиях была снижена на компоненты с 17-96%).

2. Без внесения существенных изменений в конструкцию двигателя можно добиться значительного снижения массы систем подачи и хранения водорода на борту автомобиля за счет установки электролизера и его компонентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Veziroglu TN. 1987, International Journal of Hydrogen Energy 12:99 INSPEC Compendex.
2. Winter CJ. 1987, International Journal of Hydrogen Energy 12:521 INSPEC Compendex.
3. Serpone N, Lawless D, Terzian R. 1992, Solar Energy 49:221 INSPEC Compendex.
4. Zweig RM. 1992, Proceedings of the Ninth World Hydrogen Energy Conference. Paris (France) :1995.
5. Rever B. 2001, Renewable Energy World, Review Issue 2001–2002 ed. by James x James, vol.4, no 4, p177.
6. Gretz J. 1992, Proceedings of the Second World Renewable Energy Congress. Reading (England) :2438.
7. Block DL, Veziroglu TN. 1994, Hydrogen energy progress X, Proceedings of the Tenth World Hydrogen Energy Conference. Cocoa Beach (Florida, U.S.A.), Foreword.
8. King RO, Rand M. 1955, —The hydrogen engine|| Canadian Journal Technology 33:445–69.
9. Erren RA, Campbell WH. 1933, —Hydrogen a Commercial fuel for internal combustion engines and other purposes|| J Inst Fuel 1933; 6:277–90.
10. Cox KE, Williamson KD. 1977, —Hydrogen: its technology and implications|| Vols. I–V Boca Raton, FL: CRC Press.
11. Peavey MA. 2003, —Fuel from Water: Energy Independence with Hydrogen||, (Merit Products) 11th Edition p. 135-137.
12. Sierens R, Rosseel E. 1995. —Development of a multipoint timed injection S.I. natural gas engine|| ASME Spring Engine Technology Conference, Marietta (Ohio).
13. ICE, vol. 24, Natural Gas and Alternative Fuels for engines, p. 99–104.

14. Sierens R, Rosseel E. 1995. —Sequential injection of gaseous fuels|, Proceedings of the Fifth International EAEC Congress, Strasbourg, June, Paper No SIA 9506A03. p. 10.
15. Sierens R, Rosseel E. 1998 —Variable composition hydrogen-natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions| ASME 1998 Spring Engine Technology Conference, Fort Lauderdale, Paper No 98-ICE-105, (26–29 April 1998).
16. A. Vressner, A. Hultqvist, P. Tunestal and B. Johansson, “Fuel effects on ion current in an HCCI engine,” SAE Paper. 2005. № 2005-01-2093.
17. L. Winkler, N. Hegman, C. Raffay and A. Palotas, “Ion current measurements in natural gas flames,” European combustion meeting. 2007.
18. M. Hellring, T. Munter, T. Rögnvaldsson, N. Wikström, C. Carlsson, M Larsson and J. Nytomt. Robust AFR Estimation Using Ion Current and Neural Networks. SAE 1999-01-1161
19. A. Saitzkoff, R. Reinmann, F. Mauss and M. Glavmo In-Cylinder Pressure Measurements Using the Sparg Plug as an Ionization Sensor. SAE 970857
20. E.A. VanDyne, C.L. Burcmyer, A.M. Wahl and A.E. Funaioli Misfire Detection from Ionization Feedback Utilizing the Smartfire Plazma Ignition Tecnology. SAE 2000-01-1377
21. Auzins J., H. Johansson and J. Nytomt Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock, and Engine Control. SAE 950004
22. Smolenskaya N.M. and Korneev N.V. Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.
23. Вибе И.И., Тепловой расчёт двигателей внутреннего сгорания / И.И. Вибе // Челябинск.: Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, 1972. - с.282
24. Проскурин, В.Ф. Цепно-тепловой взрыв и степень ионизации водородовоздушного пламени / В.Ф. Проскурин, П.Г. Бережко, Е.Н.

- Николаев, В.Н. Тараканов, П.Е. Половинкин, А.Г. Лещинская // Физика горения и взрыва. 2005. № 1. С.15-23.
25. Сеначин, П.К. Моделирование процесса горения гомогенной смеси в двигателе с искровым зажиганием / П.К. Сеначин, М.А. Ильина, Д.Д. Матиевский, М.Ю. Свердлов //Тез. XII симпозиума по горению и взрыву, 11-15 сентября 2000 г. Черногловка: РАН, 2000.-ч.3. - с.155-157.
 26. Daniels, C. F. The comparison of mass fraction burned obtained from the cylinder pressure signal and spark plug ion signal / SAE paper № 980140, 1998.
 27. Eriksson, L. Requirements for and a systematic method for identifying heat release model parameters. Modeling of SI and Diesel Engines / SAE Paper № 980626, 1998.
 28. Franke, A. Employing an ionization sensor for combustion diagnostics in a lean burn natural gas engine / A. Franke, P. Einewall, B. Johansson, R. Reinmann // SAE paper № 2001-01-0992, 2001.
 29. Frenklach, M. GRI-Mech / M. Frenklach, T. Bowman, G. Smith, B. Gardiner // entnommen am 18.06.2009, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/. 2009.
 30. Grill, M. Objektorientierte Prozessrechnung von Verbrennungsmotoren / M.Grill // Stuttgart, Universität, Dissertation. 2006a.
 31. Gülder, Ö. L. Turbulent Premixed Combustion Modelling using Fractal Geometry / Ö.L. Gülder // in: 23. Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute. 1990.
 32. Herdin, G. Emissionsproblematik bei Biogasmotoren / G.Herdin // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007.
 33. Heywood, J. B. Fluid Motion Within the Cylinder of Internal Combustion Engines - The 1986 Freeman Scholar Lecture / J. B. Heywood // Journal of Fluids Engineering Vol. 109 / 3. 1987.

34. Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals / J. B. Heywood// New York: McGraw-Hill. 1988.
35. Hiroyasu, H. Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber / H. Hiroyasu, T. Kodata // SAE Paper 740715. 1974.
36. Huiming, Z. Investigation on the Combustion Characteristics of the Compression Ignition Divided Chamber Combustion System of the Natural Gas Engine / Z. Huiming, Z. Defu, Z. Qingping // in: CIMAC Congress. Wien. 2007.
37. Jobst, J. Simulation von Zündverzug, Brennrate und NO_x-Bildung für direktgezündete Gasmotoren / J. Jobst, F. Chmela, A. Wimmer // in: 1. Tagung Motorprozesssimulation und Aufladung. Berlin. 2005.
38. John, A. Entwicklung und Erprobung eines zweistufigen Impaktors zur Messung alveolengängiger Quarzfeinstaubemissionen und Durchführung von Validierungsmessungen / A. John, H. Kaminski, T. Kuhlbusch // Duisburg, IUTA e.V., Bericht. 2004.
39. Kettner, M. Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Optimierung der Entflammung von mageren Gemischen bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung / M. Kettner // Karlsruhe, Universität, Dissertation. 2006.
40. Klimstra, J. The road to obtain the ultimate performance of gas engines - opportunities and challenges / J. Klimstra // in: 5. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau. 2007.
41. Koch, T. Numerischer Beitrag zur Charakterisierung und Vorausberechnung der Gemischbildung und Verbrennung in einem direkteinspritzenden, strahlgeführten Ottomotor / T. Koch // Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation. 2002.
42. Kogler, G. Potential of HCCI for large natural gas fueled engines / G. Kogler, A. Wimmer // in: CIMAC Congress. Wien. 2007.

43. Kolb, T. Experimentelle und theoretische Untersuchung zur Minderung der NO_x-Emission technischer Feuerungen durch gestufte Verbrennungsführung / T. Kolb // Karlsruhe. Technische Hochschule, Dissertation. 1990.
44. Kozuch, P. Ein phänomenologisches Modell zur kombinierten Stickoxid- und Rußberechnung bei direkteinspritzenden Dieselmotoren / P. Kozuch // Stuttgart, Universität, Dissertation. 2004.
45. Kuhlmann, R. M. V. Improvement of a Model for Calculation of Oxides of Nitrogen Emissions from Spark Ignition Engines / R.M.V. Kuhlmann, J. R. Sodre // SAE-Paper 2004-01-3001. 2004.
46. Lämmle, Ch. Numerical and Experimental Study of Flame Propagation and Knock in a Compressed Natural Gas Engine / Ch. Lämmle // Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation. 2005.
47. Liao, S. Y. Determination of laminar burning velocities for natural gas / S. Y. Liao, D. M. Jiang, Q. Cheng // Fuel 83 (2004). Elsevier. Science Direct. 2004.
48. Magnussen, B. F. On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with special emphasis on Soot formation and Combustion / B. F. Magnussen, B. H. Hjertager // in: 16. Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. Pittsburgh. 1976.
49. Merker, G. Technische Verbrennung - Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse / G. Merker, Ch. Schwarz // Stuttgart: Teubner. 2001.
50. Noske, G. Ein quasidimensionales Modell zur Beschreibung des ottomotorischen Verbrennungsablaufes / G. Noske // Düsseldorf: VDI Verlag. 1988.
51. Warriar G. R., Dhir V. K. Heat Transfer and Wall Heat Flux Partitioning During Subcooled Flow Nucleate Boiling, Journal of Heat Transfer 128(12). 2006. p.1243-1256. DOI: 10.1115/1.2349510