

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 кафедры)
13.04.03 «Энергетическое машиностроение»
(код и наименование направления подготовки)
Энергетические установки транспортных систем
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Оценка возможностей повышения эффективности процесса
сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования

Студент(ка)

Е.В. Сусликов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель магистерской
программы

д.т.н., профессор А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2019 г.

Допустить к защите

Зав. кафедрой «ЭМСУ»

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2019 г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования	7
1.1 Обзор литературных источников по возможности применения электропроводности пламени для диагностики и управления ДВС ...	7
1.2 Водород как автомобильное топливо	9
1.3 Исследование воздействия газообразного водорода на процесс сгорания природного газа в поршневых двигателях	12
1.4 Влияние добавок водорода к природному газу на эмиссию токсических компонентов в продуктах сгорания двигателя с искровым зажиганием	16
1.5 Заключение по 1 разделу	20
ГЛАВА 2 Описание экспериментальной части диссертационного исследования	22
2.1 Экспериментальная установка	23
2.2 Датчики, применяемые при исследованиях	27
2.3 Взаимосвязь электропроводности пламени и эффективности процесса сгорания.....	31
2.3.1 Взаимосвязь электропроводности пламени и продолжительности фаз сгорания, определяемых по магнитострикционному датчику.....	31
2.4 Выбор оптимального варианта направления исследований.....	33
2.5 Выводы по второму разделу	35
ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования	37
3.1 Результаты экспериментальных исследований	37

3.2 Обзор результатов экспериментального исследования в УИТ-85 при работе на СПГ и СПГ с добавками водорода	43
3.3 Экспериментальные исследования на двигателе ВАЗ-2111.....	51
ГЛАВА 4 Оценка возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	64

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Развитие современного автомобилестроения идет по пути перехода от жидких нефтяных топлив к газовым. Основным газовым топливом является природный газ, который, наряду со своей дешевизной, имеет также еще и значительно большие запасы по сравнению с нефтью. Таким образом частичный переход автомобильного транспорта на природный газ позволит снизить нагрузку на нефтяные запасы и, тем самым, на ближайшие 50-100 лет отодвинуть вопрос о целесообразности активного внедрения альтернативных источников питания на автотранспорте. Но природный газ имеет свои недостатки, а именно, он не всегда обеспечивает равномерность состава смеси по цилиндру, имеет большую энергию активации процесса горения, что увеличивает длительность процесса сгорания. Особенно важными эти проблемы становятся на режимах глубокого дросселирования и малых нагрузках, где двигатели на природном газе имеют значительные проблемы по выполнению современных норм токсичности и эффективности процесса сгорания.

Проводимое исследование направлено на изучение воздействия газообразного водорода на процесс сгорания природного газа в поршневых двигателях для оптимизации работы ДВС с искровым зажиганием, обеспечивающих снижения потребление природного газа на 30-40% в режиме городского цикла, при значительном уменьшении токсичности ОГ и выбросов парниковых газов

Целью работы является оценка возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования.

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

1. обобщение результатов экспериментального исследования по выявлению особенностей влияния добавки водорода, на протекание процесса сгорания в ДВС на сжатом природном газе;
2. оценка возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования.

Объект исследования: ДВС на сжатом природном газе с промотирующими добавками водорода.

Предмет исследования: процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования.

Методы исследования.

Метод теоретического исследования включающий в себя: критический аналитический обзор по проблеме исследования, современные методы предварительного компьютерного моделирования.

Метод экспериментального исследования, включающий в себя: подготовку исследовательской базы, проведение экспериментальных исследований на специальной исследовательской установке УИТ-85 позволяющей проводить исследования влияния водорода на процесс сгорания с высокой точностью, при возможности независимого варьирования основными характеристиками, а также применение экспериментальных методов, включающих в себя следующее:

- стендовые испытания на одноцилиндровой исследовательской установке УИТ-85,
- стендовые испытания на двигателе ВАЗ с распределенным впрыском топлива.

Достоверность полученных результатов исследования обусловлена большим объемом экспериментов, применением методов статистической обработки данных.

Научная новизна исследования

Оценка возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования.

Практическая значимость работы:

Обобщены результаты экспериментального исследования по выявлению особенностей влияния добавки водорода, на протекание процесса сгорания в ДВС на сжатом природном газе.

На защиту выносятся:

1. обобщение результатов экспериментального исследования по выявлению особенностей влияния добавки водорода, на протекание процесса сгорания в ДВС на сжатом природном газе;
2. оценка возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научных и обсуждались на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» и на конференции в 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликована 1 печатная работа.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 62 наименования. Работа изложена на 71 страницах машинописного текста, иллюстрированного 4 таблицей и 36 рисунками.

ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования

Оценивая основные направления исследований, проводимых ведущими мировыми автопроизводителями можно сделать вывод, что новым альтернативным видом топлива для транспортных средств в ближайшее время станет добавка водорода к основному углеводородному топливу. Данный подход объясняется возможностью получения необходимого количества водорода непосредственно на борту автомобиля питаемым от генератора электролизером воды. При этом достигается значительная экономия углеводородных ресурсов, а также значительное снижение выбросов парникового газа CO_2 , так как при сгорании водорода образуется вода, которая возвращается обратно в биосферу [1]. В настоящее время в странах-членах ЕС распространена практика налогового регулирования по нормам выбросов парниковых газов. Так в Германии с 2009 года перешли от налога с транспортного средства к налогообложению, основанному на показателе выброса углекислого газа автомобилем. Россия, в настоящее время, содействует в решении глобальных экологических проблем связанных с уменьшением выбросов парниковых газов.

1.1 Обзор литературных источников по возможности применения электропроводности пламени для диагностики и управления ДВС

Согласно общепринятой, в настоящее время, теории цепных реакций, определяющее влияние на развитие этих реакций оказывают активные частицы, которые легко вступают в соединение с исходными или промежуточными продуктами при минимальной энергии активации. При сгорании углеводородных топлив такими частицами являются атомы

водорода, кислорода и радикал ОН [4]. Таким образом, добавка водорода приводит к увеличению концентрации активных частиц в продуктах сгорания и, следовательно, к увеличению нормальной скорости распространения пламени, которая зависит в основном от скорости диффузии активных частиц в несгоревшую смесь при температурах соответствующих температурам сгорания в двигателях [4]. Рост нормальной скорости сгорания, вызванный увеличением концентрации активных частиц, по данным ряда исследований, приводит к улучшению динамики тепловыделения в двигателе [5]. В тоже время, отсутствуют данные показывающие, насколько изменяется скорость распространения пламени и характеристика тепловыделения относительно количества добавляемого водорода к основному топливу.

В результате анализа проводимых исследований по выявлению влияния добавки водорода на процесс сгорания бензовоздушной смеси, следует отметить, что проводимые экспериментальные исследования, в большей степени, проводились по методике черного ящика, где задавались параметры на впуске, и определялся отклик на выпуске, на основании чего и судили о влиянии водорода на процесс сгорания. Лишь незначительная часть исследований проводилась с использованием методов визуализации процесса сгорания. Результаты таких исследований сложно распространять на другие типы двигателей, где было показано, что полученные зависимости применительно к другому двигателю имеют расхождение с экспериментальными данными в 3 – 4 раза [6]. По результатам анализа стало ясно, что необходимо получить адекватные данные о протекании внутрицилиндровых процессах сгорания ДВС на природном газе с малыми добавками водорода. Также, требуется получение адекватных зависимостей, позволяющих определять одни из основных характеристик процесса сгорания, таких как характеристика тепловыделения и скорость распространения пламени. Данные характеристики, во многом, определяются интенсивностью протекания химических реакций во фронте пламени. Таким образом, выявление особенностей влияния добавки водорода на сгорание во

фронте пламени, в условиях ДВС с искровым зажиганием, позволит получить больше фундаментальной информации о протекании физико-химических процессов и выявит механизмы и пути повышения эффективности процесса сгорания при низкой токсичности отработавших газов (ОГ). Полученные результаты позволят разрабатывать энергоэффективные двигатели с высокой экономичностью за счет установки бортового электролизера воды, что и показывает актуальность проводимых исследований.

1.2 Водород как автомобильное топливо

Водород показывает отличительные особенности приемлемого не содержащего углерода топлива. Водородное сгорание не производит ядовитые продукты, такие как углеводороды, угарный газ, оксиды серы, органические кислоты или двуокись углерода. Прибавьте дождь, последствие формирования SO_2 , и парниковые эффекты CO_2 от этих двигателей устранены. Известно, что утечка водорода не имеет никакого повреждающего эффекта на экологическую обстановку за счет его высокой плавучести и диффузности в воздухе. Не сгоревший водород быстро рассеивается в атмосфере. Утечка бензин с другой стороны часто создает пожароопасность, и, в некоторых случаях, является загрязняющим веществом грунтовой воды.

У водорода нет проблем с распылением и парообразованием как у жидких топлив, используемых в холодной погоде. Водород легко смешивается с воздухом, и смесь весьма устойчива в комнатной температуре; однако, энергия воспламенения водорода низка по сравнению с другими газообразными и жидкими топливами, и он является горючим при очень незначительной концентрации. Пределы воспламеняемости водорода изменяются между 4 и 74 процента по объему в воздухе в комнатной температуре и давлении. Водородо-воздушные смеси обладают широким диапазоном скоростей пламени и температур сгорания.

Водород является самым легким из элементов с атомным весом 1.0 и самый малый атом. Низшая теплотворная способность водорода на единицу массы 120 МДж/г, а метана 50 МДж/г, в тоже время объемная энергия, выделяемая при сгорании почти в 2,5 раза меньше чем у природного газа.

Как топливо для двигателя внутреннего сгорания, водород является взрывчатым веществом, и его безопасность нужно рассмотреть. Из-за его низкой энергии воспламенения возможность преждевременного воспламенения – большая проблема. Малое расстояния гашения водорода позволяет пламени проходить через узкие открытия (впускные и выпускные клапаны), и отдельные источники пламени могут пройти во впускной трубопровод. Двигатель, работающий на водороде при стехиометрических или богатых смесях подвержен детонации. Но, эта та же особенность сгорания позволяет осуществлять процесс сгорания с обогащенным водородом двигателем на природном газе на бедной и сверх бедной смеси, без детонации, неполного сгорания или пропуска зажигания [8]. Много экспериментальных и теоретических изучений были выполнены с водородом как топливо для двигателей с искровым зажиганием, причем в последнее время большое внимание стало уделяться проблемам сгорания метановодородных смесей.

В таблице 1.1 проведено сравнение качества шести различных топлив. Двигатели с искровым зажиганием могут работать на всех шести топливах отдельно или в комбинациях друг с другом. Некоторые из этих топлив представляют значительный интерес из-за расширенного количества кислорода и доступного водорода - Ali и Basit, [9] сообщали, что важная роль в воспламенении и сгорании - водородное содержание (отношение H/C) в топливах. Газообразные топлива с более высоким содержанием водорода более устойчиво сгорают, гладко и легкое воспламеняются.

Таблица 1.1 – Качества водорода, пропана, метанола, этилового спирта, метана и бензина, [9].

Показатели	Водород H ₂	Пропан C ₃ H ₈	Метанол CH ₃ OH	Этиловы й спирт C ₂ H ₅ OH	Метан CH ₄	Бензин C ₈ H ₁₅
Молекулярная масса	2.016	44.097	32.042	46.069	16.043	-110.0
Плотность (kg/m ³)*	0.09	1.97	787	783	0.716	748.5
Нижняя теплотворная способность топлива (MJ/g)	119.93	46.4	20	26.9	50.02	44
Высшая теплотворная способность топлива (MJ/g)	141.86	50.4	22.7	29.7	55.53	47.3
Концентрация горючего в воздухе (Vol.%)**	Arg-75	2.1-9.5	6.7-36	3.3-19	5.0-15	1.3-7.1
Стехеометрическое отношение A/F (kg/kg)	34.3	15.67	6.47	9	17.23	14.6
Минимальная энергия воспламенения (MJ)	0.02	0.25	-		0.28	0.25
Температура самовоспламенения***	400	458	385	365	540	440
Температура адиабатического пламени	2384	2268			2227	2270
Максимальная скорость горения в воздухе (cm/sec) ****	325	46.4	50.4		44.8	58.2
Коэффициент диффузии (cm ² /sec)	0.63				0.2	0.08

* Плотность в kg/m³ при 0 °C и 1 атм.

** Предел распространения пламени горючих газов и паров в воздухе при 25 °C и 1 атм.

***Температура самовоспламенения при 1 атм. за исключением водорода при 0.9 атм.

**** - Скорость горения в воздухе при 25 °C и 1 атм.

Таблица 1.1 показывает некоторые из качеств этих переменных топлив. Большинство – углеводороды и поэтому при сгорании образуется CO, CO₂, CH и NO_x. Единственное исключение - водород, который только производит загрязнение NO_x.

Однако применение водорода в качестве основного топлива сдерживается следующими факторами:

- При составах водородовоздушной смеси, близких к стехиометрическому, нарушается рабочий процесс, сгорания приобретает характер детонационного и возникают обратные вспышки на всасывании, при подаче водорода во впускной тракт мощность и КПД двигателя снижаются.
- Сложности хранения и получения достаточного количества водорода на борту автомобиля.
- Высокая стоимость получения водорода.

Природный газ, который является комбинацией 90%-ого СН + и 10%-ый этан (C_2H_6) в зависимости от источника, тоже является одним из низкотоксичных топлив благодаря своей высокой скорости сгорания и отсутствию образования жидкой фазы. Сжатый природный газ под высоким давлением может быть размещен на автомобиле в достаточном количестве при соблюдении всех требований безопасности его хранения. Природный газ обладает свойствами чистого сгорания, и СН и СО и NO_x при работе на природном газе с добавками водорода.

1.3 Исследование воздействия газообразного водорода на процесс сгорания природного газа в поршневых двигателях

Проблемы энергетической нехватки и контроля за загрязнением окружающей среды со все более и более строгим регулированием эмиссии приводят к интенсивному исследованию высокоэффективных двигателей низкой токсичности. Значительные внимания были обращены на потенциальные альтернативные виды топлива, которые могут гореть чисто и эффективно в двигателях внутреннего сгорания. Природный газ, вследствие его особенностей сгорания и большого запаса, широко используется в двигателях с воспламенением от искры [17]. Однако, у метана, который

является главным составом природного газа, есть уникальная четырёхгранная молекулярная структура с большей энергией связи С-Н, таким образом демонстрирует некоторые уникальные особенности сгорания, такие как высокая температура воспламенения и низкая скорость сгорания [18], что приводит к плохой работе на бедных смесях и долгой продолжительности сгорания. Как следствие, проблемы с эффективностью процесса сгорания и высокая токсичность по СН и NO_x. Один из эффективных подходов, для решения этой проблемы, это смешение природного газа с водородом, чтобы уменьшить задержку воспламенения и увеличить скорость сгорания. Предыдущие исследования показали, что, обогащенный водородом природный газ может способствовать распространению пламени и стабильности сгорания, приводя к быстрому процессу сгорания и уменьшению неравномерности циклов (рисунок 1.1) [7,11,19].

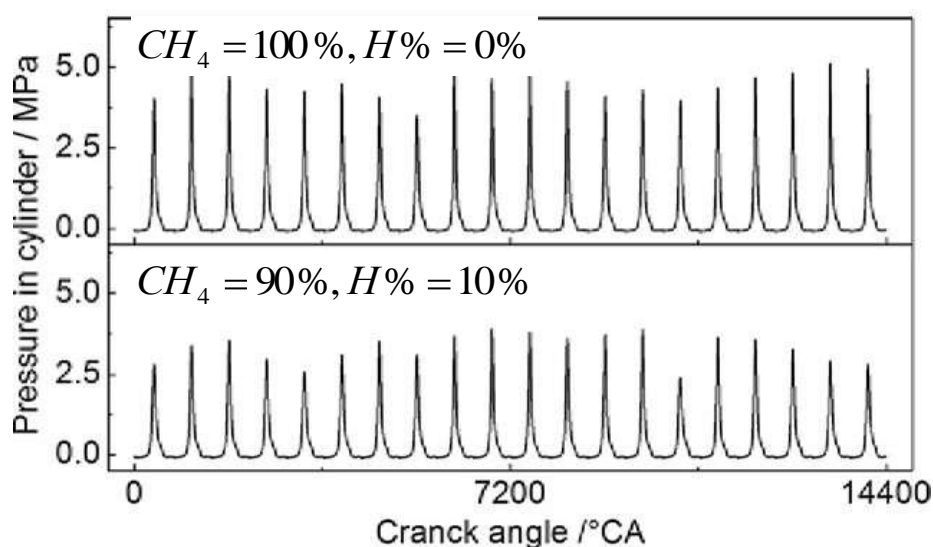


Рисунок 1.1 – Изменение давления в цилиндре двигателя за время 20 циклов при работе на природном газе и с 10%-ой добавкой водорода.

Добавление водорода к природному газу увеличивает скорости сгорания (рисунок 1.2) [21], а также расширяет область обеднения смеси. Водород, кроме того, снижает выбросы по HC и увеличение выбросов NO_x для постоянного соотношения коэффициента избытка воздуха и угла

опережения зажигания. Увеличить скорость горения позволяет уменьшить времена зажигания и всего процесса сгорания, что уменьшает потери тепла и приводит к повышению эффективности (рисунок 1.3 и 1.4).

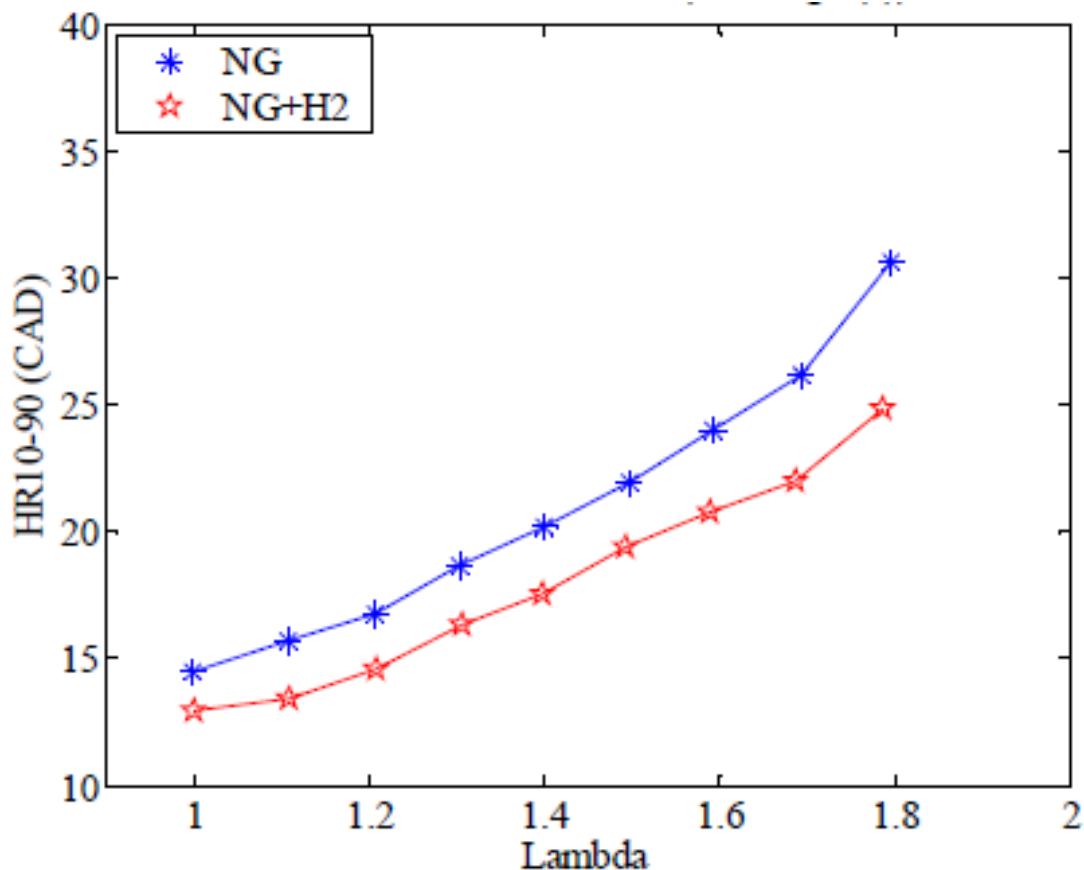


Рисунок 1.2 – Влияние добавки 5% водорода (H₂) от массы топлива в метановоздушную смесь (NG) на продолжительность основной фазы сгорания «HR10-90(CAD)» = 10-90% массы сгоревшей ТВС в зависимости от состава смеси (Lambda= α коэффициент избытка воздуха).

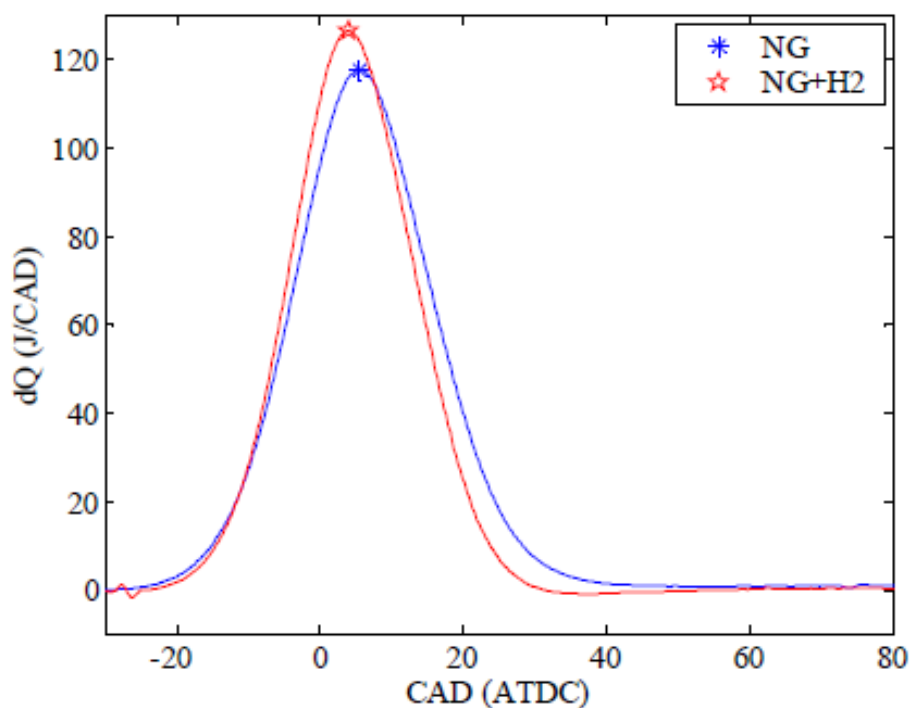


Рисунок 1.3 – Влияние добавки 5% водорода от массы топлива в метановоздушную смесь (NG) на скорость тепловыделения « $dQ(J/CAD)$ » в зависимости от угла поворота коленчатого вала, начиная от ВМТ процесса сгорания «CAD(ATDC)».

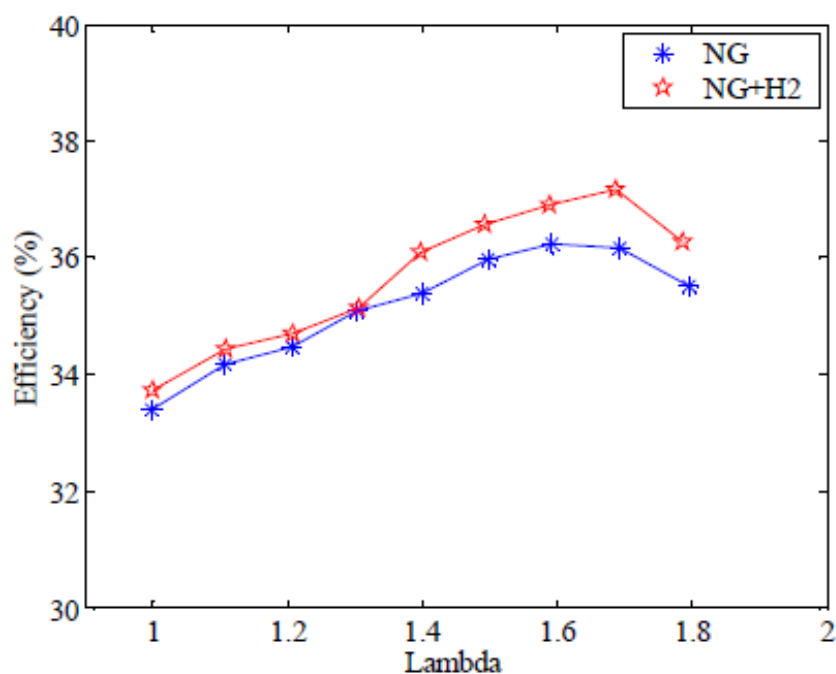


Рисунок 1.4 – Влияние добавки 5% водорода (H_2) от массы топлива в метановоздушную смесь (NG) на эффективность (КПД) процесса сгорания в зависимости от состава смеси ($\Lambda = \alpha$ коэффициент избытка воздуха).

Расширение пределов эффективного обеднения при повышении эффективности процесса сгорания позволяет работать при добавке водорода к природному газу с одинаковой эффективностью на более бедных смесях при более низких выбросах CH_4 , и что также приводит к снижению максимальной температуры и, следовательно, более низким уровнем выбросов NO_x . Добавление водорода таким образом, позволяет найти компромисс для минимального выброса HC и NO_x , что позволяет перейти на более высокие требования по токсичности, чем при работе на чистом природном газе.

Влияние водорода более заметно для камер сгорания с низкой интенсивностью турбулентности, и менее заметна для специально спроектированных камер сгорания с высокой интенсивностью турбулентности заряда в процессе сгорания. Однако при работе на высоких оборотах (более 4000 об/мин) влияние водорода на скорость распространения пламени природного газа значительно возрастает даже для камер сгорания с высокой интенсивностью турбулентности. Это и следовало ожидать, так как турбулентность позволяет осуществлять сгорание природного газа и без добавки водорода на малых и средних оборотах достаточно эффективно, однако при этом остается проблема с первой фазой сгорания, т.е. воспламенением природного газа.

1.4 Влияние добавок водорода к природному газу на эмиссию токсических компонентов в продуктах сгорания двигателя с искровым зажиганием

Альтернативные виды топлива имеют большие перспективы из-за строгих требований к токсичности отработавших газов, роста цен на нефтяные топлива (бензин и дизельное) и значительное увеличение темпа истощения ресурсов сырой нефти. Поэтому, автопроизводители перемещают

свои исследования, для развития двигателей, которые используют альтернативные виды топлива, такие как сжатый природный газ (CNG) [14,15]. Приведем некоторые преимущества этого топлива по сравнению с бензином:

- Лучшее формирование смеси и более однородное сгорание
- Возможность использования более высоких степеней сжатия, без детонации из-за высокого октанового числа CNG.
- Меньшую температуру сгорания CNG, что снижает токсичность ОГ по NO.
- CNG более чистое топливо, которое можно поставлять на рынок сразу после добычи, и нет необходимости в постройке заводов по переработке как, например, у нефтяных топлив.
- Лучшие условия работы смазки на стенках цилиндра, т.к. оно не смывается жидкой фазой, тем самым повышается ресурс цилиндропоршневой группы.

Богатые ресурсы природного газа и обширные сети станций поставки CNG в некоторых странах позволило активно использовать CNG в качестве автомобильного топлива.

Много исследований и экспериментальной работы были сделаны на двигателях, питаемых CNG. [21,22] В проектировании турбулентного эффекта, чтобы увеличить скорость пламени сгорания природного газа, Йоханссон и Олссон [16] исследовали десять различных конфигураций камеры сгорания. Результаты показывают высокую корреляцию между турбулентностью и темпом роста температуры в процессе сгорания. Однако, результаты также показали, что конфигурации, которые дали самое быстрое сгорание, будут более токсичными по концентрации NO. В результате как показали исследования наиболее эффективным способом повысить скорость и эффективность процесса сгорания, является применение активирующих добавок в топливо. Как показали исследование наилучший эффект наблюдается при добавке водорода.

В [12,13] были изучены эффекты добавки водорода на процесс сгорания природного газа в двигателе с искровым зажиганием. Согласно их результатам, добавляя водород в CNG-воздушную смесь снизил задержку воспламенения и увеличил скорость горения сгорания. На рисунке 1.5 показано влияние добавки водорода на ламинарную скорость распространения пламени метановоздушной смеси. Из рисунка видно, что добавка водорода расширяет пределы устойчивого сгорания, повышает скорость сгорания на 9% при добавке 10% водорода и на 15 при добавке 20% водорода.

Добавка 24% водорода в природный газ позволило осуществить высокоэффективный процесс сгорания на бедной смеси. При этом, как показывают исследования происходит также заметное улучшение эффективности процесса сгорания и при работе на мощностных составах смеси. Увеличение происходит, вероятно, из-за более быстрого сгорания, которое увеличивает эффективное отношение расширения, которое позволяет большему количеству работы быть извлеченным. Сокращение эмиссии CO_2 является, однако существенным, 28% из-за уменьшенного углеродистого содержания за одну только энергетическую единицу. По сравнению с работой на бензине сокращение эмиссии CO_2 составляет 45%, принимая равную эффективность процесса сгорания и работы двигателя. Сравнивающееся одно-цилиндрическое исследование с чистым водородом показало значительно более низкую эффективность из-за увеличенных потерь высокой температуры.

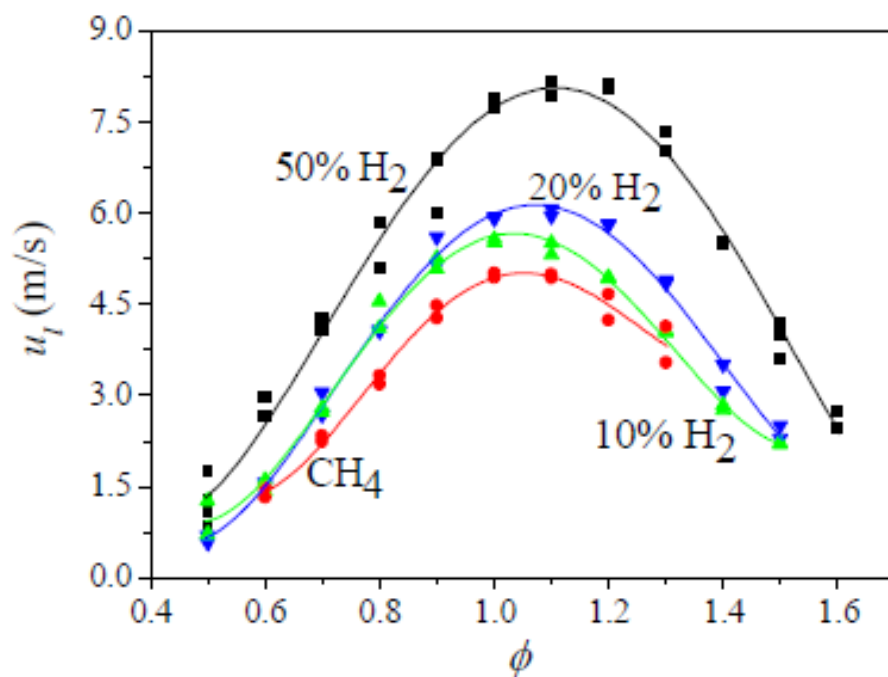


Рисунок 1.5 – Экспериментальное исследование ламинарной скорости распространения пламени в зависимости от состава смеси $\phi = 1/\alpha$; где CH₄ – сгорание метана, 10%H₂ сгорание метана с добавкой 10% водорода, 20%H₂ сгорание метана с добавкой 20% водорода, 50%H₂ сгорание метана с добавкой 50% водорода.

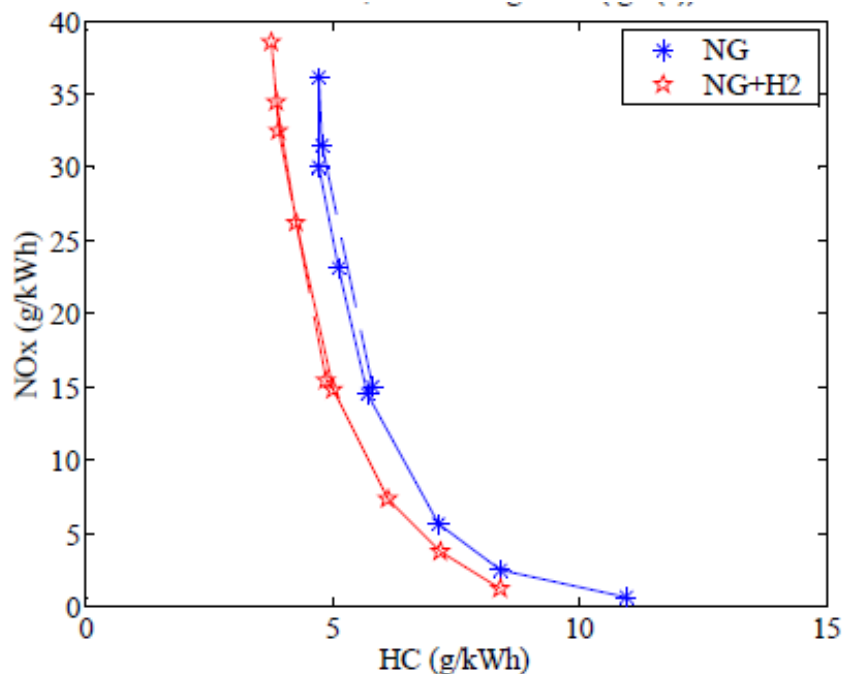


Рисунок 1.6 – Влияние добавки 5% водорода (H₂) от массы топлива в метановоздушную смесь (NG) на эмиссия NO_x и HC относительно получаемой на двигателе нагрузки г/кВтч.

Исследования влияния добавки водорода на токсичность ОГ, проведенные [14] показали, (рисунок 1.6), что эмиссия NO_x и HC относительно получаемой на двигателе нагрузки г/кВт ч, снижается при добавке 5% водорода от массы топлива на 8-19% в зависимости от состава смеси. Исследование показывает, что токсичность снижается при добавке водорода. Показано что при работе на бедных смесях концентрация NO_x ниже 0,06 г/кВт ч, что меньше требований ЕВРО-5 без применения каталитического нейтрализатора. Полученные данные показывают значительное влияние добавки водорода природный газ на снижение токсичности отработавших газов.

1.5 Заключение по 1 разделу

Анализ и обобщение результатов, выполненных по рассматриваемой проблеме исследований позволяют сделать следующее заключение.

Добавка небольшого количества водорода (до 7% от массы основного топлива) к природному газу привносит следующее влияние на процесс сгорания:

- Повышается скорость распространения пламени, как ламинарная, так и турбулентная. При этом с увеличением турбулентности ТВС в процессе сгорания эффективность добавки водорода уменьшается.
- Снижается задержка воспламенения, и общая продолжительность процесса сгорания, что обеспечивает высокую эффективность работы двигателя при работе на высоких оборотах (выше 4000 об/мин).
- Повышение скорости тепловыделения обеспечивает меньшие тепловые потери рабочего процесса, что позволяет получить увеличение мощности, при уменьшении вводимой тепловой энергии в цилиндр двигателя за счет меньшей объемной теплоты сгорания у водорода по сравнению с природным газом.

- Расширяются пределы эффективного обеднения смеси, что позволяет осуществлять качественное регулирование, тем самым, повышая эффективность работы двигателя.
- Более широкий рабочий диапазон обеспечивает снижение токсичности как по СН, так и по NO_x.

Таким образом, для создания научно-технических основ проектирования низкотоксичных, высокоэффективных ДВС на альтернативных видах топлива с использованием возобновляемых источников энергии, оборудованных системой подачи водорода от электролизера необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований по определению влияния добавки водорода на характеристики процесса сгорания бензинового ДВС с распределенным впрыском топлива, а также для создания модели сгорания ТВС с добавкой водорода, связывающей среднюю скорость распространения пламени, ее электропроводность и ширину зоны горения в различных зонах камеры сгорания с эффективностью тепловыделения и токсичностью отработавших газов, в зависимости от изменения скоростного режима, состава смеси, нагрузки и угла опережения зажигания, позволяющую ускорить процесс создание и проектирования поршневых ДВС нового поколения.

ГЛАВА 2 Описание экспериментальной части диссертационного исследования

Процесс сгорания является сложным и зачастую стохастичным процессом, имеющим свою неравномерность. При этом получение низкотоксичного процесса сгорания возможно зачастую в узком диапазоне составов смеси и определенных температурах процесса сгорания и температурах охлаждения продуктов горения. Для выполнения поставленной цели требуется четкое поддержание необходимых условий горения. При этом непосредственный мониторинг процесса сгорания осложняется высокими температурами (2500 – 3000 К) и высокими давлениями (5 – 20 МПа) при высокой скорости протекания процесса (10 – 200 м/с), что затрудняет применение многих датчиков для непосредственного контроля за процессом. Одной из определяющих характеристик процесса сгорания является характеристика распространения фронта пламени. Достаточно давно известно, что фронт пламени представляет собой быстропротекающий процесс окисления, схожий по многим свойствам с плазмой [1, 2]. Также известно, что плазма является электропроводящей средой. Поэтому более 80 лет назад начались активные исследования явления электропроводности пламени для выявления возможностей глубже понять физику процесса горения и получить инструмент для диагностики процесса сгорания в энергетических установках [3 - 6]. В настоящее время существуют успешно применяемые образцы устройств контроля за процессом сгорания, основанные на явлении электропроводности пламени [7 - 13]. Они применяются в топках печей для поддержания низкотоксичного режима работы. А также в газотурбинных двигателях по ним контролируют протекания процесса сгорания и возможность форсирования двигателя при работе на больших высотах [14]. Явлению электропроводности пламени нашло применение и в других сферах, где процесс сгорания является в той или иной мере стационарным или непрерывным. Попытки применения

электропроводности пламени для контроля автомобильными двигателями известны давно. Но в ДВС протекание процесса сгорания осложняется перемещением поршня, постоянным изменением скорости тепловыделения по времени, высокой турбулентностью потока и малым временем всего процесса сгорания (от 10 мс при низких частотах вращения до 1 мс при максимальных частотах вращения коленчатого вала). Это приводит к сложностям снятия качественного сигнала характеристики электропроводности пламени, позволяющего иметь постоянно достоверную картину процесса сгорания [15 - 20]. Поэтому в этой статье мы рассмотрим некоторые вопросы конструкции датчиков, их питание и интерпретации получаемых сигналов для контроля и диагностики процесса сгорания поршневых ДВС с искровым зажиганием.

2.1 Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились на одноцилиндровой установке УИТ-85 (рисунок 2.1) и на двигателе ВАЗ-2111 (рисунок 2.2), в том числе и с пониженной степенью сжатия за счет применения специально изготовленной для проведения экспериментов исследовательской алюминиевой пластиной (рисунок 2.3) толщиной 4 мм. Основные характеристики применяемых двигателей с искровым зажиганием и исследуемые режимы работы приведены в таблице 2.1.

Выбор данных двигателей в качестве экспериментальных установок обоснован их спецификой, так одноцилиндровая установка УИТ-85 способна с высокой точностью воспроизводить полученные результаты, а в двигателе ВАЗ-2111, мы можем наблюдать классическую картину сгорания характерную для большинства двигателей с искровым зажиганием, но при этом головка блока цилиндров этого двигателя имеет большой запас прочности, что позволяет разместить в ней датчики ионизации без существенного влияния на работоспособность двигателя.

Таблица 2.1 – Основные характеристики применяемых двигателей и исследуемые режимы работы

Тип	УИТ-85	ВАЗ-2111	ВАЗ-2111 с пластиной
Число цилиндров	1	4	4
Рабочий объем, л	0,652	1,499	1,499
Степень сжатия	7	9,8	7,5
Диаметр цилиндра, мм	85	82	82
Ход поршня, мм	115	71	71
Длина шатуна, мм	266	121	121
Частота вращения, мин ⁻¹	900	880	880
Подача топлива: – бензин; – сжатый природный газ; – водород	– карбюратор; – форсункой во впускной коллектор; – форсункой во впускной коллектор	– форсункой на клапан; – форсункой во впускной коллектор; – форсункой во впускной коллектор;	– форсункой на клапан; – форсункой во впускной коллектор; – форсункой во впускной коллектор;
Исследуемые режимы работы: – нагрузка; – угол опережения зажигания; – состав смеси по коэффициенту избытка воздуха	– максимальная не регулируется; – 13° ПКВ для всех режимов – от 0,85 до 1,42 при работе на бензине – от 0,73 до 1,5 при работе на СПГ	– холостой ход – от 24° до 35° ПКВ для бензина – от 30° до 42° ПКВ для СПГ – от 0,7 до 1,5 при работе на бензине – от 0,82 до 1,6 при работе на СПГ	– холостой ход – от 35° до 42° ПКВ для всех исследуемых видов топлива – от 0,76 до 1,42 при работе на бензине – от 0,9 до 1,42 при работе на СПГ

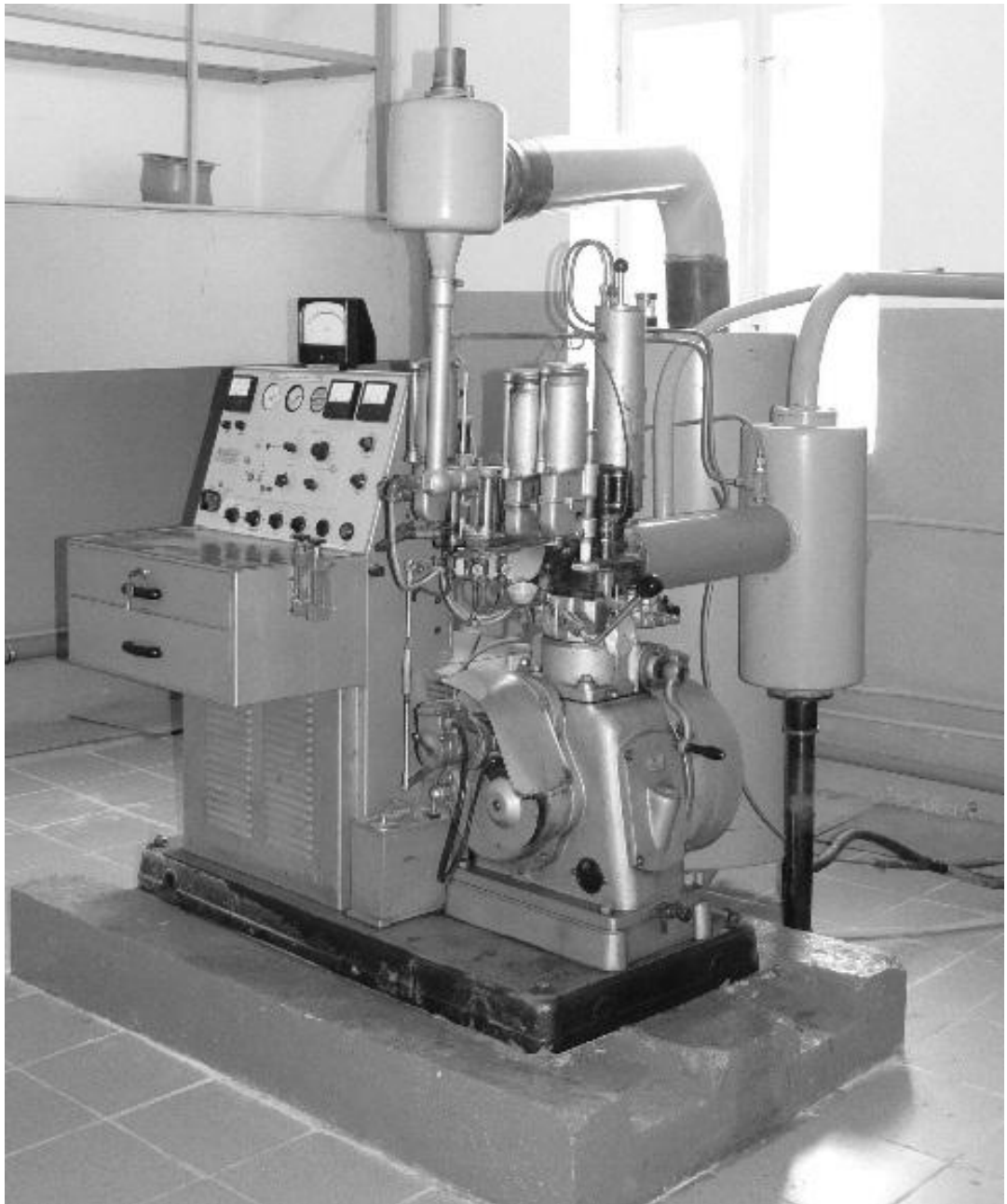


Рисунок 2.1 – Внешний вид исследовательской одноцилиндровой установки

УИТ-85

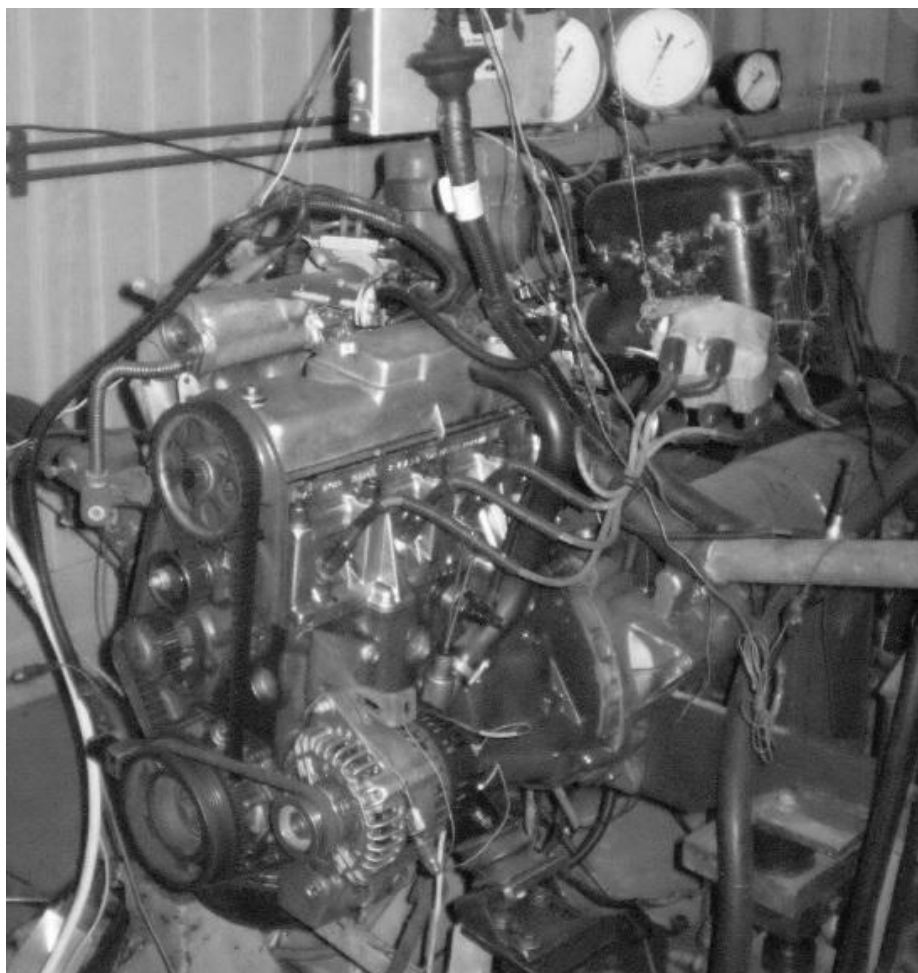


Рисунок 2.2 – Внешний вид исследовательской установки на базе двигателя
ВАЗ-2111

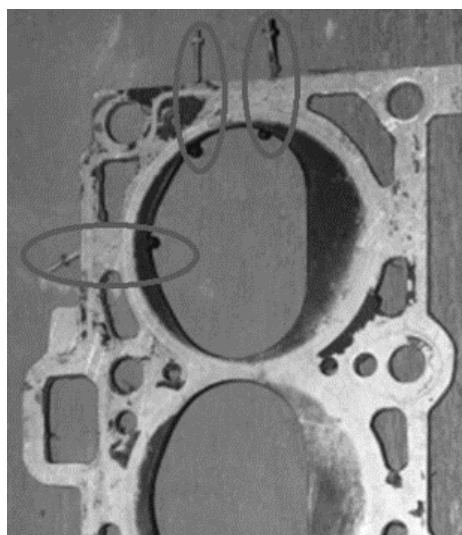


Рисунок 2.3 – Исследовательская пластина с датчиками ионизации,
снижающая степень сжатия двигателя ВАЗ-2111 до 7,5

Оценку токсичности отработавших газов проводили переносными газоанализаторами фирмы «МЕТА» Автотест-01.03П и Автотест-02.03П, которые определяли концентрацию токсичных компонентов (NO_x , CH и CO) в выхлопных газах.

2.2 Датчики, применяемые при исследованиях

В качестве датчиков для исследования электропроводности пламени в УИТ-85 применялись стальные или медные стержни толщиной 1 мм, которые вставлялись в керамический изолятор, схема их расположения приведена на рисунке 2.4. В двигателе ВАЗ-2111 применялись алюминиевые стержни толщиной 1,2 мм с электроизолирующим слоем (применялось микродуговое окислирование с участием микродобавок SiO_2) [21]. Также применялись стальные стержни толщиной 1 мм, которые вставлялись в керамический изолятор. Общий вид датчиков для исследования электропроводности пламени, применяемых в УИТ-85, представлен на рисунке 2.5, а для двигателя ВАЗ – на рисунке 2.3. В качестве топлива в УИТ-85 и ВАЗ-2111 применяли бензин, а также бензин с добавками водорода [22, 23, 24].

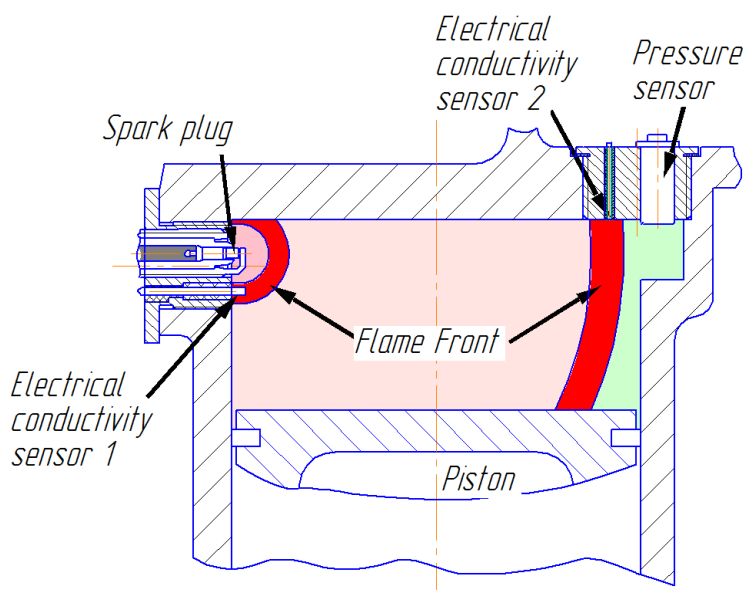


Рисунок 2.4 – Схема расположения датчиков для измерения электропроводности пламени в УИТ-85



а)

б)

в)

Рисунок 2.5 – Общий вид датчиков для исследования электропроводности пламени в УИТ-85: а) медный электрод у свечи зажигания; б) стальной электрод в переходнике с датчиком давления; в) пять стальных электродов в одном корпусе.

Для исследования влияния малых добавок водорода в ТВС на процесс сгорания автомобильного двигателя обеспечивающего требования по токсичности на уровень выше, чем у существующих и проектируемых вновь двигателей спроектированы модели ионизационных датчиков, устанавливаемых в головку блока двигателя автомобиля. Определены места установки датчиков для получения максимальной информации о протекании процесса сгорания и собраны экспериментальные установки рисунки 2.5, 2.6 и 2.7

Применяемая электрическая схема для измерения электропроводности пламени для установки УИТ-85 с пятиэлектродным датчиком (Рисунок 2.5в) при работе на бензине приведена на рисунке 2.6. Источником питания здесь являлся гальванический элемент +9 V. При работе УИТ-85 с датчиками (рисунок 2.5а и рисунок 2.5б) применялась электрическая схема, изображенная на рисунке 2.7, где в качестве источника питания применялся источник постоянного тока с напряжением 360 V, которые получают путём преобразования переменного тока после стабилизатора напряжения 220 V в постоянный.

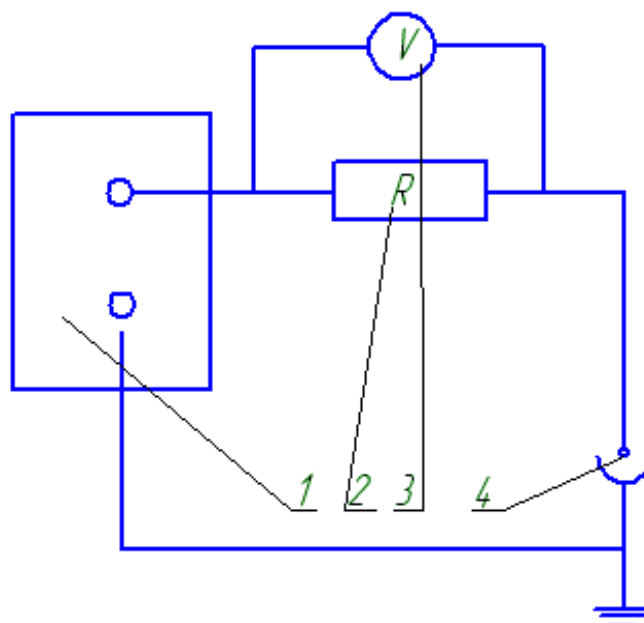


Рисунок 2.6 – Схема измерения электропроводности пламени: 1 – Источник постоянного тока «Крона» 9V; 2 – измерительный резистор; 3 – осциллограф; 4 - датчик электропроводности

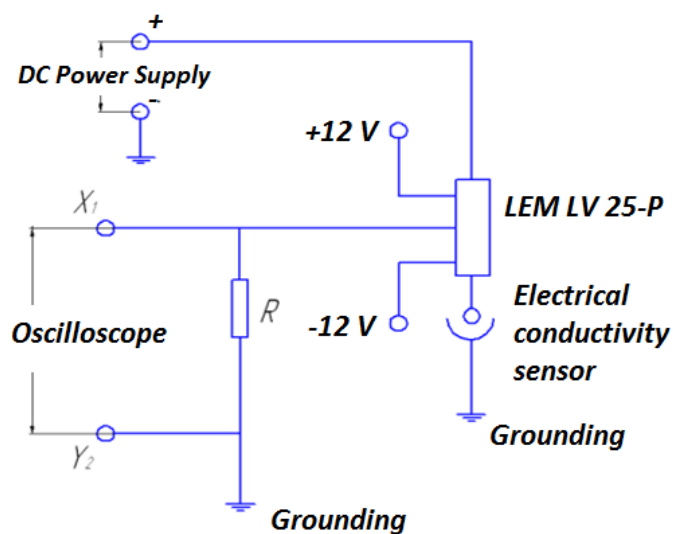


Рисунок 2.7 – Схема измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой

Основные испытания проводились уже с алюминиевыми датчиками, представленными на Рисунке 2.3 с многоканальной схемой измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой (Рисунок 2.8) при питании от источника постоянного тока с напряжением 600 V.

Увеличение напряжения на датчиках для измерения электропроводности пламени с 360 до 600 В объясняется большей стабильностью сигнала при увеличении напряжения в зазоре между электродом датчика и корпусом двигателя. Переход со стальных электродов в керамическом изоляторе на алюминиевые, с электроизолирующим оксидным слоем, связано с необходимостью уменьшить воздействие на головку блока цилиндров от установленных в неё датчиков, и с повышением надежности конструкции. Переход на стальные электроды позволил снизить нагрузки от термических напряжений. А оксидирование позволило уменьшить диаметр отверстия с 2,5 до 1,3 мм, что повысило работоспособность данной системы измерения.

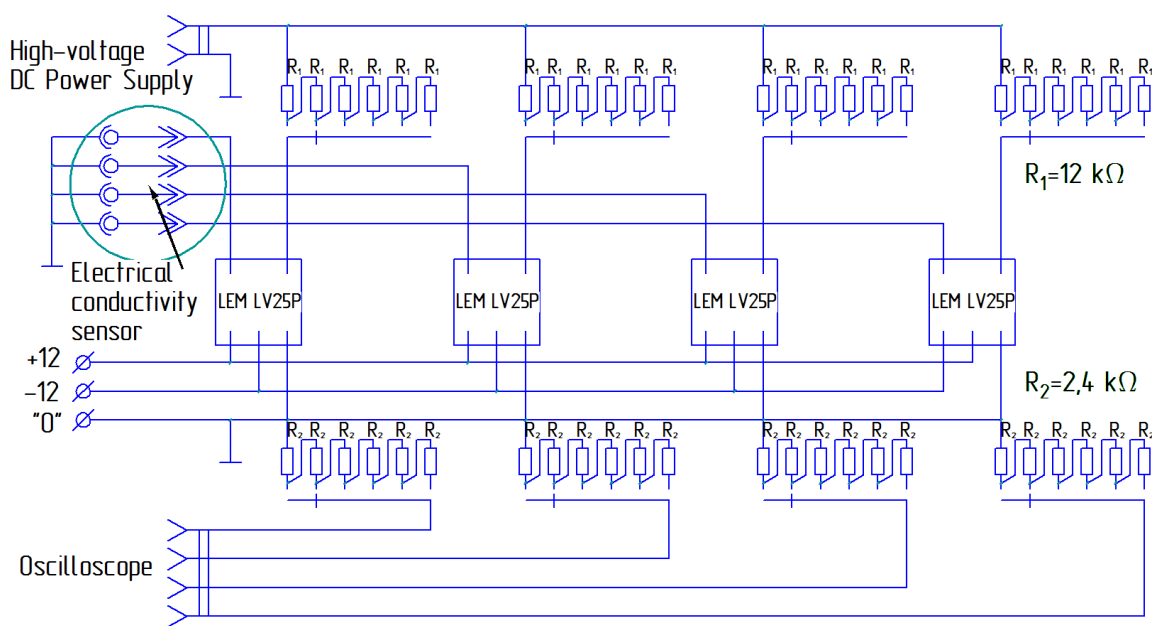


Рисунок 2.8 – Многоканальная схема измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой

А в на рисунке 2.9 представлена характеристика цепи ионизационного зонда показывающая линейность соотношения силы тока и напряжения в цепи ионизации.



Рисунок 2.9 – Характеристика цепи ионизационного зонда

2.3 Взаимосвязь электропроводности пламени и эффективности процесса сгорания

2.3.1 Взаимосвязь электропроводности пламени и продолжительности фаз сгорания, определяемых по магнитострикционному датчику

В работе определялась продолжительность отдельных фаз сгорания и всего процесса сгорания ТВС по магнитострикционному датчику, позволяющему достаточно точно выявить продолжительность всех фаз сгорания и оценить эффективность протекания процесса сгорания. Для удобства анализа процесса сгорания принято разделять на фазы. В работе процесс сгорания был разделен на фазы согласно определениям, принятым в

работах Соколика и Иноземцева. При этом использовались новые более точные способы определения фаз сгорания.

Первая фаза – фаза воспламенения и подготовки к активному сгоранию, сгорает около 10% ТВС, рисунке 2.10 определялась, как время от подачи искры до момента соответствующему отрыву (превышению на 5%) скорости изменения давления в процессе сгорания определяемому по магнитострикционному датчику от скорости изменения давления без сгорания. Что соответствует завершению формирования развитого фронта пламени из начального очага горения, возникшего между электродами свечи, и показывает начало активного тепловыделения в процессе сгорания. При этом использование магнитострикционного датчика позволило более точно определить окончание 1 фазы сгорания (Рисунок 2.10), так как на нем более отчетливо видно начало активного тепловыделения.

Основная фаза – фаза воспламенения и завершения активного сгорания в ней происходит сгорание около 90% всей введенной ТВС, рисунок 2.10, определялась, как время от подачи искры до достижения максимума давления в КС, что соответствует нулевому значению на магнитострикционном датчике. Что соответствует воспламенению и распространению турбулентного фронта пламени по всему объему КС, следовательно, окончанию активного тепловыделения в процессе сгорания (осталось только догорание в объеме и в пристеночном слое).

Вторая фаза – фаза активного тепловыделения и распространения турбулентного фронта пламени, рисунок 2.10, в ней сгорание около 80% всей ТВС и определялась она по магнитострикционному датчику, и соответствовала промежутку от окончания первой до окончания второй фазы сгорания.

Третья фаза – фаза догорания, рисунок 2.10, в ней происходит догорание оставшихся около 10% ТВС, это догорание в объеме за фронтом пламени и сгорание в пристеночном слое, характеризуется окончанием процесса сгорания и определяется как время от достижения максимума

давления до прекращения тепловыделения, что соответствует минимуму на магнитострикционном датчике.

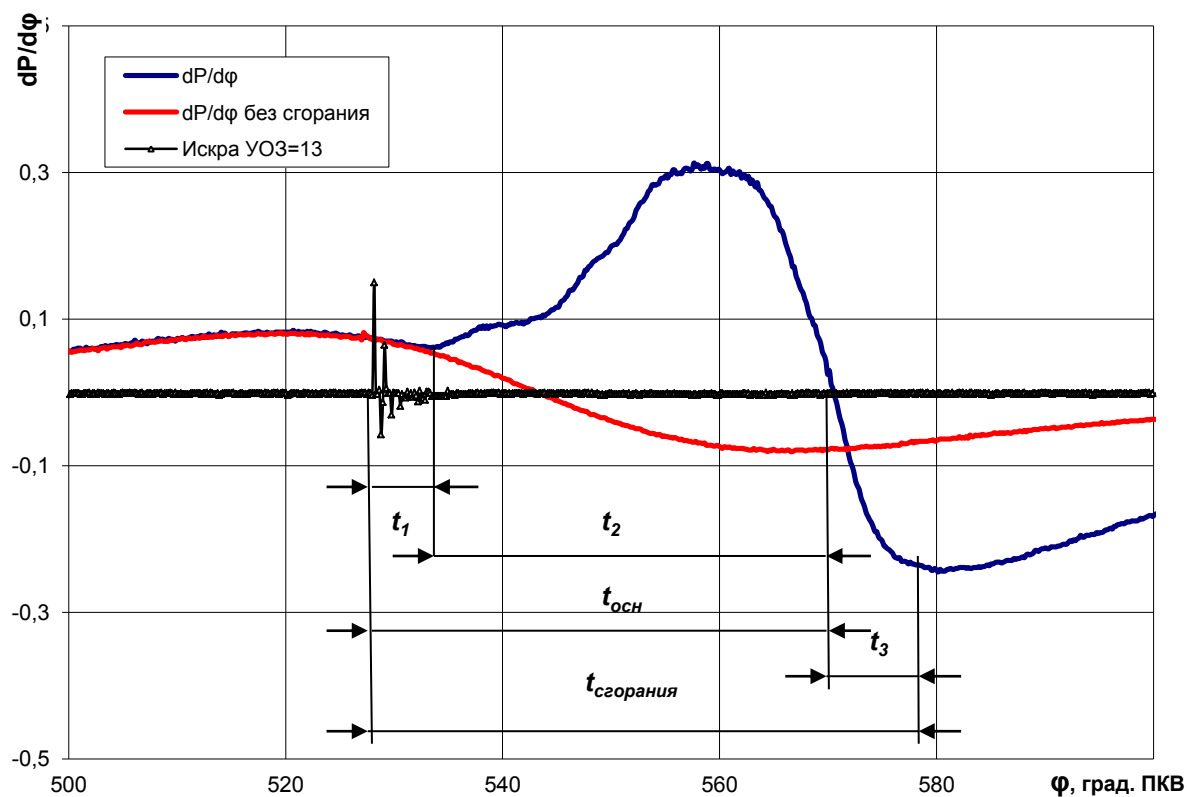


Рисунок 2.10 – Определение фаз сгорания по магнитострикционному датчику

Как показывалась выше электропроводность пламени, отражает физико-химические процессы сгорания, происходящие в цилиндре двигателя, поэтому выявление взаимосвязи между геометрической и объемной скоростью распространения пламени и ее связь с электропроводностью пламени позволит значительно расширить возможности применения ионизационного датчика, в качестве основы для безинерционной непрерывной системы контроля и управления процессом сгорания.

2.4 Выбор оптимального варианта направления исследований

Оптимальный вариант направления исследований должен охватывать наиболее значимые пробелы в данной области знаний, а также обеспечивать

максимально выгодное дальнейшее практическое применение результатов. В соответствии с целями работы необходим анализ влияния добавок водорода на скорость распространения пламени в условиях ДВС.

Скорость распространения пламени и ширина зоны горения представляются основными параметрами сгорания, определяющими эффективность и токсичность рабочего процесса в камере сгорания данной конструкции с данным видом топлива.

Кроме скорости распространения и ширины зоны горения, значительный интерес представляет исследование электропроводности пламени в условиях ДВС. Имеющиеся результаты исследований взаимосвязи электропроводности пламени с основными факторами, определяющими рабочий процесс, а также с результирующими параметрами, характеризующими эффективность рабочего процесса, позволяют предположить значительную перспективность данного направления исследований. Результаты работ в данном направлении будут иметь научную новизну и высокое прикладное значение как для исследований ДВС в процессе проектирования и доводки, так и для создания новых систем управления двигателем. В будущем предстоит разработка алгоритма анализа сигнала ионного тока в камере сгорания ДВС с целью извлечения максимальной информации о сгорании.

В связи с этим, наиболее целесообразно проработать вопросы, касающиеся влияния газообразного водорода и состава смеси на скорость распространения, электропроводность пламени и ширину зоны горения, а также на динамику тепловыделения и токсичность продуктов сгорания. Для достижения поставленных целей необходимо использовать экспериментальные методы исследования, а также теоретический анализ.

Критерием оптимальности должна служить максимальная научная новизна и практическая значимость результатов при минимальных затратах на исследования.

2.5 Выводы по второму разделу

В результате проведенного анализа существующим методов и способов проведения исследований был выбран оптимальный вариант проведения экспериментальных и теоретических исследований, включающий в себя следующее:

Экспериментальные исследования

1. Экспериментальные исследования влияние малых добавок водорода в метановоздушную смесь будут проводиться на специальной одноцилиндровой исследовательской установке УИТ-85 с высокой точность поддерживаемых параметров, для получения наиболее адекватных и точных результатов позволяющих выявить особенности и закономерности влияния малых добавок водорода на протекание процесса сгорания природного газа.
2. Экспериментальные исследования влияние малых добавок водорода в метановоздушную смесь будут проводиться на двигателях ВАЗ с распределённым впрыском топлива, для уточнения и распространения полученных результатов на УИТ-85 на серийно выпускаемый двигатель с высокими показателями по токсичности и эффективности процесса сгорания.
3. Экспериментальные исследования влияние добавки водорода в метановоздушную смесь на изменение давления в процессе сгорания будут проводиться с использованием пьезоэлектрического датчика давления, установленного в свече зажигания.
4. Экспериментальные исследования влияние добавки водорода в метановоздушную смесь на токсичность отработавших газов будет проводится с использованием микропроцессорного газоанализатора «АВТОТЕСТ-02 CO-CO₂-CH-O₂-NO_x-λ-T» фирмы «МЕТА»(Россия).
5. Экспериментальные исследования влияние добавки водорода в метановоздушную смесь на скорость распространения пламени в

основной фазе сгорания будут проводиться с использованием датчиков ионизации, расположенных в камере сгорания в наиболее удаленной её части.

6. Экспериментальные исследования влияние добавки водорода в метановоздушную смесь на скорость распространения пламени вблизи стенок камеры сгорания будут проводиться с использованием датчиков ионизации, расположенных по камере сгорания (у свечи зажигания, у выпускного клапана и двух удаленных от свечи зажигания местах).
7. Экспериментальные исследования влияние добавки водорода в метановоздушную смесь на ширину фронта пламени и интенсивность протекания химических реакций во фронте пламени будут проводиться с использованием датчиков ионизации расположенных по камере сгорания (у свечи зажигания, у выпускного клапана и двух удаленных от свечи зажигания местах), что позволит получить адекватную картину влияния малых добавок водорода в метановоздушную смесь на распространения пламени в камере сгорания ДВС с искровым зажиганием.

Теоретические исследования

Теоретические исследования влияние добавки водорода в метановоздушную смесь на протекание процесса сгорания будут проводиться с использованием современных методов моделирования, включающих в себя моделирование в специальном программном комплексе по моделированию газодинамических процессов программный пакет Fluent фирмы Ansys и программный пакет Wave фирмы Риккардо.

Также теоретические исследования будут включать анализ и сравнения полученных данных с данными, приведенными в ведущих рецензируемых источниках.

ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования

3.1 Результаты экспериментальных исследований

Работа автомобильного двигателя на природном газе в условиях сильной забалластированности отработавшими газами, что характерно для режимов работы при глубоком дросселировании и малых нагрузках, сопряжена со значительным ухудшением стабильности процесса сгорания, тем самым снижается его энергоэффективность и ухудшаются показатели по токсичности отработавших газов. Все это снижает привлекательность массового внедрения одного из наиболее экологически чистых и доступных топлив – природного газа для автомобильных двигателей.

Научная проблема, на решение которой направлен проект, состоит в том, что при работе поршневых ДВС на режимах глубокого дросселирования и малых нагрузках, имеется значительная забалластированность рабочей смеси остаточными газами, имеющими значительную межцикловую неравномерность, от полностью инертных при полном сгорании в предшествующем цикле, до готовых к быстрому сгоранию при пропуске зажигания. Особенно это влияет на характеристики устойчивого процесса сгорания при работе на газовом топливе. Тем самым снижается эффективность процесса сгорания и значительно повышается токсичность отработавших газов, что негативно сказывается на возможностях массового внедрения природного газа в качестве основного топлива в автомобильные двигатели.

Масштаб существующей проблемы заключается в следующем. Современные двигатели, работающие на сжатом природном газе, представляют собой либо конвертированные бензиновые двигатели

способные работать, как на бензине, так и на природном газе, но в таком случае эффективность применения природного газа значительно снижается, в связи с меньшей объемной теплоемкостью газа и худшими характеристиками воспламенения, а также с невозможностью использовать высокую детонационную стойкость природного газа, что значительно ухудшает характеристики таких ДВС. Второй тип газовых двигателей – это двигатели, работающие только на природном газе. У них имеется два основных недостатка, а именно это холодный пуск при низкой температуре и слабая развитость системы газозаправочных станций в России, что приводит к ограничению использования таких автомобилей только в больших городах, а дальние поездки за пределы сети газозаправочных станций уже становится проблемным. Поэтому предлагается разработать новый подход к организации рабочего процесса газового двигателя, имеющего возможность производить холодный пуск и эффективную работу в том числе и на бензине при отсутствии возможности заправки природным газом, а также организовать высокоэффективный рабочий процесс на основных проблемных режимах работы, а именно на режимах глубокого дросселирования и малых нагрузках.

Скорость распространения пламени является одним из определяющих параметров, характеризующих интенсивность процесса горения в цилиндре двигателя с искровым зажиганием. В настоящее время исследования условий и закономерностей сжигания бензина с добавками водорода для повышения эффективности его применения проводятся во многих странах.

Экспериментальные исследования, проведенные на четырехцилиндровом двигателе ВАЗ-2111, показали наличие связи характеристик теплоотдачи с параметрами распространения фронта пламени. На основе анализа экспериментальных данных были получены эмпирические зависимости для определения средних скоростей распространения фронта пламени в первой и основной фазах сгорания с учетом изменения различных параметров работы двигателя с искровым зажиганием.

Полученные результаты позволяют определить характеристики теплоотдачи и оценить влияние добавления водорода на процесс сжигания природного газа, который необходим для определения путей повышения эффективности процесса сгорания, в том числе при изменении параметров дросселирования.

Водород в качестве добавки к природному газу может значительно повысить эффективность и снизить токсичность выхлопных газов возвратно-поступательных ДВС. В частности, существует настоятельная необходимость проведения исследований при работе на низких частотах вращения коленчатого вала, включая режимы дросселирования, которые оказывают большое влияние на экономические и экологические характеристики двигателя, поскольку двигатель работает в этих режимах для значительного количества времени при движении в мегаполисе [1].

В этом отношении определение закономерностей, связывающих среднюю скорость распространения пламени и характеристики диссипации, имеет высокий приоритет. Это позволит на этапе проектирования двигателей, работающих на газовом топливе, повысить эффективность работы в этих режимах.

Решаемая проблема состоит в том, что при анализе термодинамических характеристик процесса сгорания из-за того, что не учитывается повышенное содержание остаточных газов при изменении сопротивления на впуске за счет изменения положения дроссельной заслонки, отсутствует достоверная оценка термодинамических характеристик процесса сгорания при работе на газовых топливах в ДВС с искровым зажиганием.

Масштаб существующей проблемы заключается в следующем. Современные двигатели, работающие на сжатом природном газе, представляют собой либо конвертированные бензиновые двигатели, способные работать, как на бензине, так и на природном газе, но в таком случае эффективность применения природного газа значительно снижается, в связи с меньшей объемной теплоемкостью газа и худшими характеристиками

воспламенения, а также с невозможностью использовать высокую детонационную стойкость природного газа, что значительно ухудшает характеристики таких ДВС. Второй тип газовых двигателей – это двигатели, работающие только на природном газе. У них имеется два основных недостатка, а именно это холодный пуск при низкой температуре и слабая развитость системы газозаправочных станций в России, что приводит к ограничению использования таких автомобилей только в больших городах, а дальние поездки за пределы сети газозаправочных станций уже становится проблемным.

Каждая из крупных автомобильных корпораций ведет свои исследования о возможности эффективного сжигания природного газа в ДВС с искровым зажиганием. В основном их исследования направлены на повышение эффективности рабочего процесса через применение водородонасыщенного природного газа, что значительно повышает характеристики холодного пуска, а эффективность высокого октанового числа природного газа они отрабатывают за счет применения наддува с различной степенью повышения давления, тем самым это позволяет им варьировать действительную степень сжатия, а также обеспечивает возможность эффективной двухтопливной работы двигателя. В России отсутствуют технологии для серийного производства малоразмерных компрессоров с необходимым КПД для легковых автомобилей, тем самым необходимо найти другой эффективный подход для решения существующих проблем с применением природного газа в ДВС с искровым зажиганием.

Основные европейские (Volkswagen (концерн); BMW, Альянс «Рено – Ниссан», и др.), японские (Тойота, Хонда и др.) и американские (корпорация Форд, GMC и Fiat Chrysler Automobiles) производители автомобилей. Применение природного газа зависит во многом от его доступности для потребителей. В Германии насчитывается более 1500 автомобильных газозаправочных станций, в США их более 10000, поэтому они и являются

основными странами, активно развивающими технологии ДВС на природном газе.

Повышение экологической безопасности автомобильных двигателей является общемировой тенденцией. Это связано с попытками улучшить экологическую обстановку в крупных городах, где на долю автомобилей выпадает до 50% всех загрязнений, выделяемых в воздух. При этом двигатель с искровым зажиганием является основным источником энергии для большинства легковых автомобилей. Поэтому постоянно ужесточаются требования к экологической безопасности выпускаемых автомобилей. В результате чего происходит постепенный переход от бензиновых двигателей к газовым, как экологически более чистым. Также активно исследуются и уже находят свое применение двигатели с добавкой водорода. В большей степени это относится к газовым двигателям. Сжатый природный газ (СПГ) с добавками водорода требует минимальной адаптации системы питания, используемой для СПГ. В связи с этим в работе проведен анализ влияния вида топлива (бензин, бензин с добавкой до 6% водорода, СПГ, СПГ с добавкой до 15% водорода) на токсичность отработавших газов в одноцилиндровой исследовательской установке и четырехцилиндровом бензиновом двигателе с искровым зажиганием на режиме холостого хода.

Результаты экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Результаты экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования при степени сжатия 9.8

п, об/мин	Р _е , кг	Р _з , КПа	УОЗ	G _в , кг/ч	G _т , мг/такт	Т _{охл} , С°	ΔР, кг/см ²	Н ₂ %	α
880	0	2388	35	7,8	6,84	85	0,64	0	0,96916
880	0	2396	38	8,3	6,38	85	0,64	0	1,05603
880	0	2572	38	8,3	8,44	85	0,63	0	0,88229
880	0	2248	38	8,6	6,15	85	0,62	0	1,1429
880	0	2365	38	8,2	6,18	85	0,64	0	1,099465
880	0	2443	40	9,4	6,02	85	0,61	0	1,22977
880	0	2676	42	10	6,05	85	0,59	0	1,31664
880	0	2825	45	11,6	6,02	85	0,57	0	1,40351
880	0	2349	35	8,3	8,17	85	0,64	0	0,88229
880	0	2752	40	8,4	8,87	85	0,6	3,103431	0,834329
880	0	2572	35	7,7	6,77	85	0,64	4,027321	0,902127
880	0	3099	32	7,2	5,71	85	0,68	4,739516	0,967043
880	0	2346	30	6,9	4,93	85	0,68	5,448522	0,997186
880	0	2122	29	6,7	4,69	85	0,68	5,711414	1,027392
880	0	2406	27	6,7	4,41	85	0,66	6,052096	1,091839
880	0	2270	25	7,4	4,33	85	0,66	6,157029	1,167755
880	0	2483	25	7,7	4,21	85	0,64	6,321432	1,236565
880	0	2438	27	7,9	4,1	85	0,64	6,480041	1,30304
880	0	2363	32	8,8	4,52	85	0,6	7,217297	1,526102
880	0	2250	30	9,4	4,77	85	0,6	6,533633	1,484291
880	0	2246	35	10	4,99	85	0,6	6,635962	1,561367
880	0	2573	40	11,7	6,14	85	0,54	6,560459	1,829519
880	0	2507	35	7,6	6,8	85	0,64	2,709733	0,92242
880	0	2405	35	8,3	8,5	85	0,62	2,179599	0,849079
880	0	2148	28	7,4	5,65	85	0,66	3,243383	0,995904
880	0	1784	25	7,1	5,38	85	0,66	3,40062	1,030176
880	0	1956	30	7,4	5,13	85	0,66	3,560442	1,0693
880	0	2093	35	7,4	4,8	85	0,66	3,795931	1,141462
880	0	2214	36	7,8	4,59	85	0,64	3,962719	1,217256
880	0	2263	35	8,6	4,76	85	0,62	3,826609	1,297546
880	0	2403	35	9,6	4,79	85	0,61	3,803554	1,379923
880	0	2483	40	10,7	5,44	85	0,57	3,732258	1,505617
880	0	2600	45	12,2	6,29	85	0,56	3,622903	1,656841

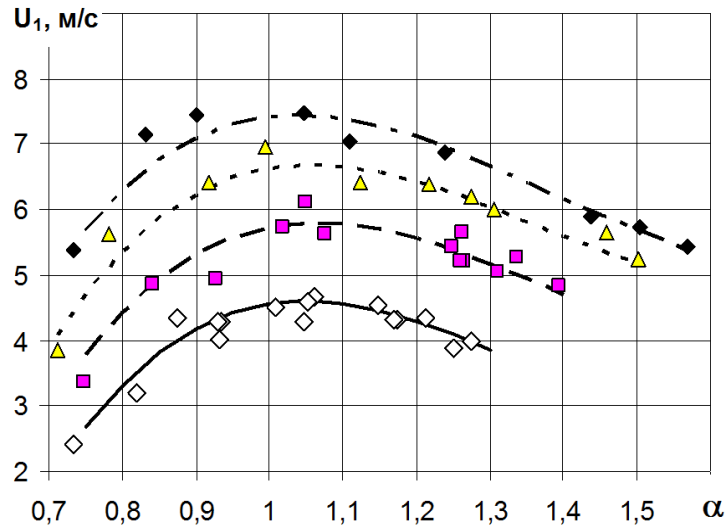
Таблица 3.2 – Результаты экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования при степени сжатия 7,5

п, об/мин	Р _е , кг	Р _з , КПа	УОЗ	Г _в , кг/ч	Г _т , мг/такт	Т _{охл} , С°	ΔР, кг/см ²	Н ₂ %	α
880	0	1,35	35	8,5	6,58	85	0,64	0	0,98328
880	0	2,05	35	9,7	6,47	85	0,62	0	1,0943
880	0	2,05	30	9,9	6,34	85	0,58	0	1,20532
880	0	1,6	32	10,7	6,25	85	0,58	0	1,31634
880	0	2,24	35	11,9	7,29	85	0,5	0	1,42736
880	0	1,8	35	9	5,98	85	0,62	0	1,14981
880	0	2,72	40	6,7	4,89	85	0,68	5,4906439	0,904672
880	0	1,9	40	6,7	4,89	85	0,68	5,4906439	0,904672
880	0	2,1	40	6,4	4,53	85	0,68	5,9012369	0,940718
880	0	1,97	40	6,7	4,31	85	0,67	6,183833	1,029044
880	0	2,8	40	6,7	4,31	85	0,67	6,183833	1,029044
880	0	2,18	40	7,1	4,28	85	0,65	6,2244796	1,119214
880	0	2,4	40	7,1	4,28	85	0,65	6,2244796	1,119214
880	0	3,05	42	7,9	4,3	85	0,64	6,1973228	1,218624
880	0	3,05	42	7,9	4,3	85	0,64	6,1973228	1,218624
880	0	2,68	42	8,3	4,36	85	0,63	6,1172556	1,268257
880	0	2,5	42	8,3	4,36	85	0,63	6,1172556	1,268257
880	0	2,4	42	8,5	4,37	85	0,62	6,1041117	1,313413
880	0	2	40	6,7	4,36	85	0,68	6,7650826	1,084838
880	0	1,55	42	6,7	5	85	0,67	3,649635	0,94542
880	0	1,8	42	6,7	5	85	0,67	3,649635	0,94542
880	0	1,7	42	6,7	4,82	85	0,68	3,7807755	0,991323
880	0	1,75	40	7,1	4,67	85	0,66	3,8974807	1,042583
880	0	2	40	7,1	4,67	85	0,66	3,8974807	1,042583
880	0	1,65	40	7,3	4,66	85	0,66	3,9055177	1,09106
880	0	1,53	40	7,3	4,66	85	0,66	3,9055177	1,09106
880	0	1,95	42	7,9	4,59	85	0,65	3,9627187	1,190784
880	0	1,55	42	7,9	4,59	85	0,65	3,9627187	1,190784
880	0	2,15	42	8,6	4,76	85	0,63	3,8266087	1,291938
880	0	2	42	8,6	4,76	85	0,63	3,8266087	1,291938
880	0	2,5	42	6,9	4,67	85	0,68	3,8974807	1,039768

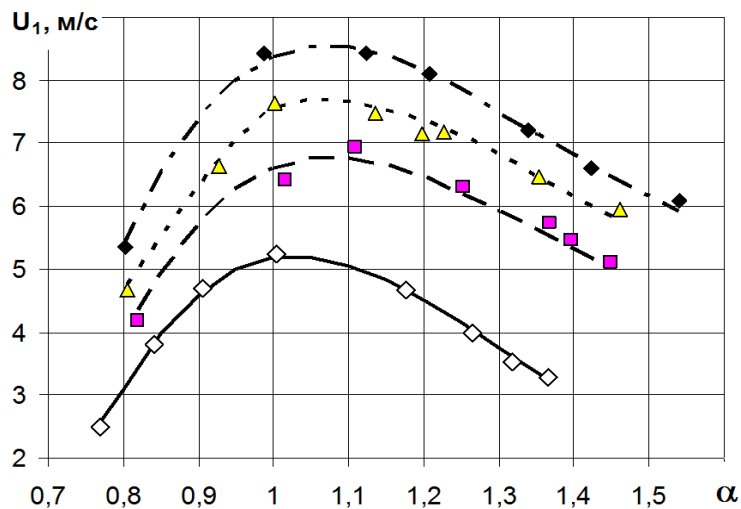
3.2 Обзор результатов экспериментального исследования в УИГ-85 при работе на СПГ и СПГ с добавками водорода

Из рисунка 3.1, где рассмотрено влияние изменения доли водорода в СПГ на среднюю скорость распространения фронта пламени в начальной фазе сгорания, а на рисунке 3.2 в основной фазе при скоростном режиме

работы УИТ-85 $n=600$ и 900 мин^{-1} , $\text{УОЗ} = 13^\circ$, $\varepsilon = 7$, видно, что увеличение доли водорода на каждые 5% дает прирост средней скорости распространения фронта пламени в начальной фазе сгорания примерно на 1 м/с. При этом, максимальные значения соответствуют составу смеси близкому к стехиометрическому.



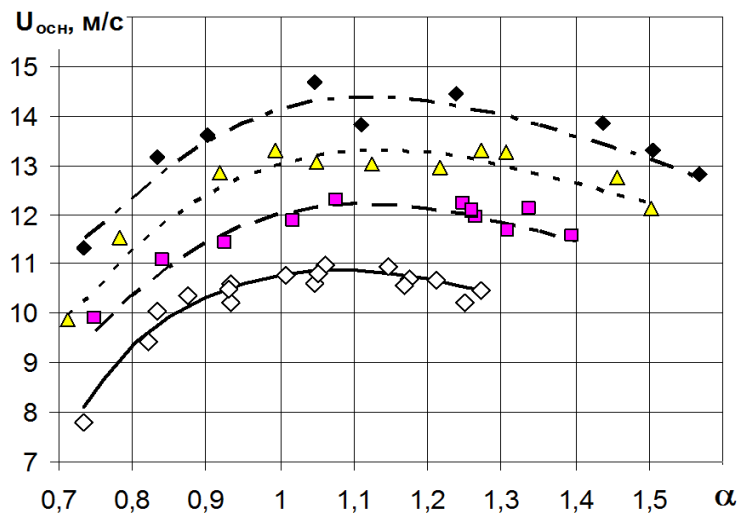
а)



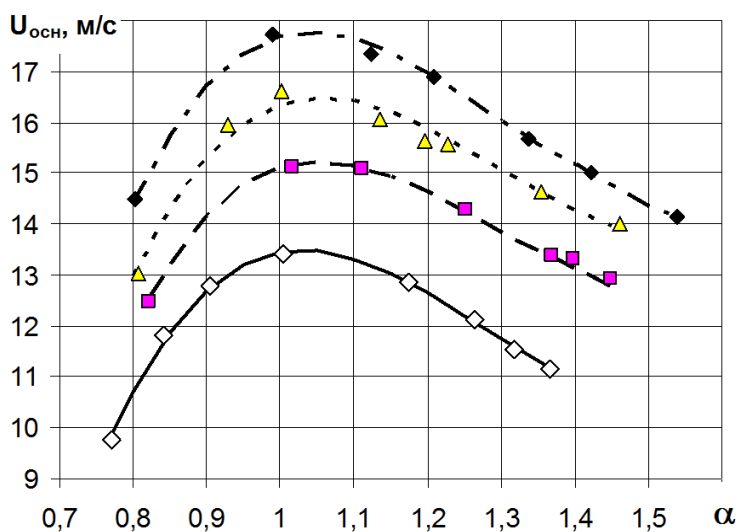
б)

- ◇ СПГ=100%; Н=0%; △ СПГ=90%; Н=10%;
- СПГ=95%; Н=5%; ◆ СПГ=85%; Н=15%;

Рисунок 3.1 – Зависимость средней скорости распространения фронта пламени в 1-ой фазе сгорания от α при работе на композитном топливе с долей водорода 0, 5, 10 и 15%. Режим работы: $\text{УОЗ} = 13^\circ\text{ПКВ}$, $\varepsilon = 7$: (а) $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; (б) $n = 900 \text{ мин}^{-1}$;



а)



б)

- ◇ СПГ=100%; Н=0%; ▲ СПГ=90%; Н=10%;
 ■ СПГ=95%; Н=5%; ◆ СПГ=85%; Н=15%;

Рисунок 3.2 – Зависимость средней скорости распространения фронта пламени в основной фазе сгорания от α при работе на композитном топливе с долей водорода 0, 5, 10 и 15%. Режим работы: УОЗ = 13°ПКВ, $\varepsilon = 7$: (а) $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; (б) $n = 900 \text{ мин}^{-1}$;

Полученные данные свидетельствуют о росте скорости сгорания при добавке водорода, причем рост скорости в процентном соотношении превосходит долю добавляемого водорода в природный газ.

На рисунке 3.3, 3.4 и 3.5 представлены индикаторные диаграммы давления по углу поворота КВ, полученные в процессе сгорания на УИТ-85 на режиме работы: УОЗ = 13°ПКВ, $\varepsilon = 7$, $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ для различных коэффициентов избытка воздуха и составов газового композитного топлива с долей водорода 0, 5, 10 и 15%.

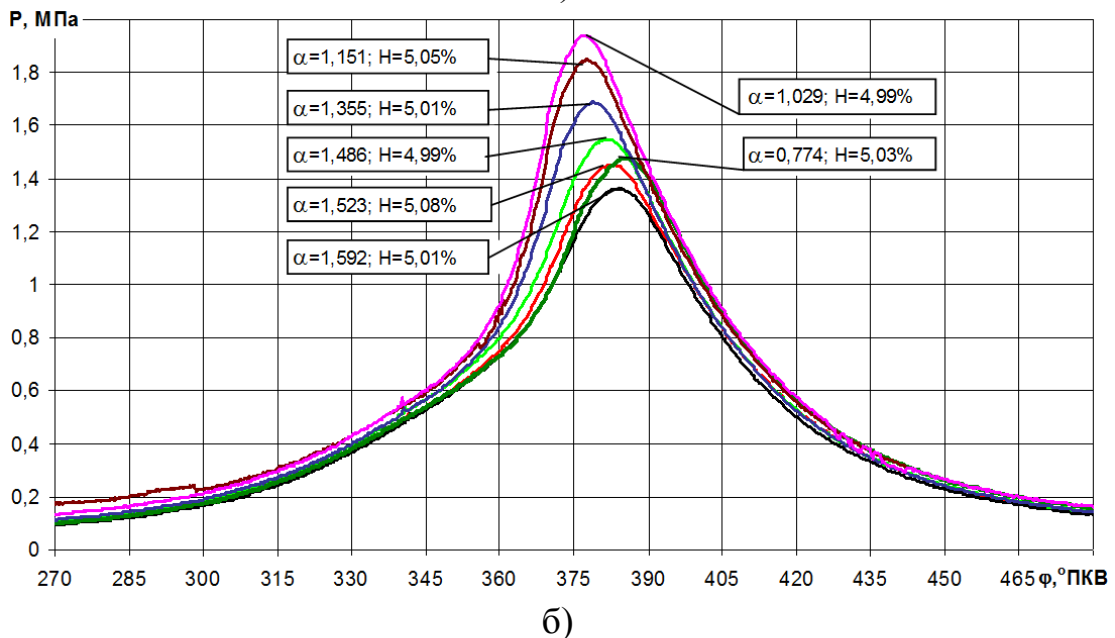
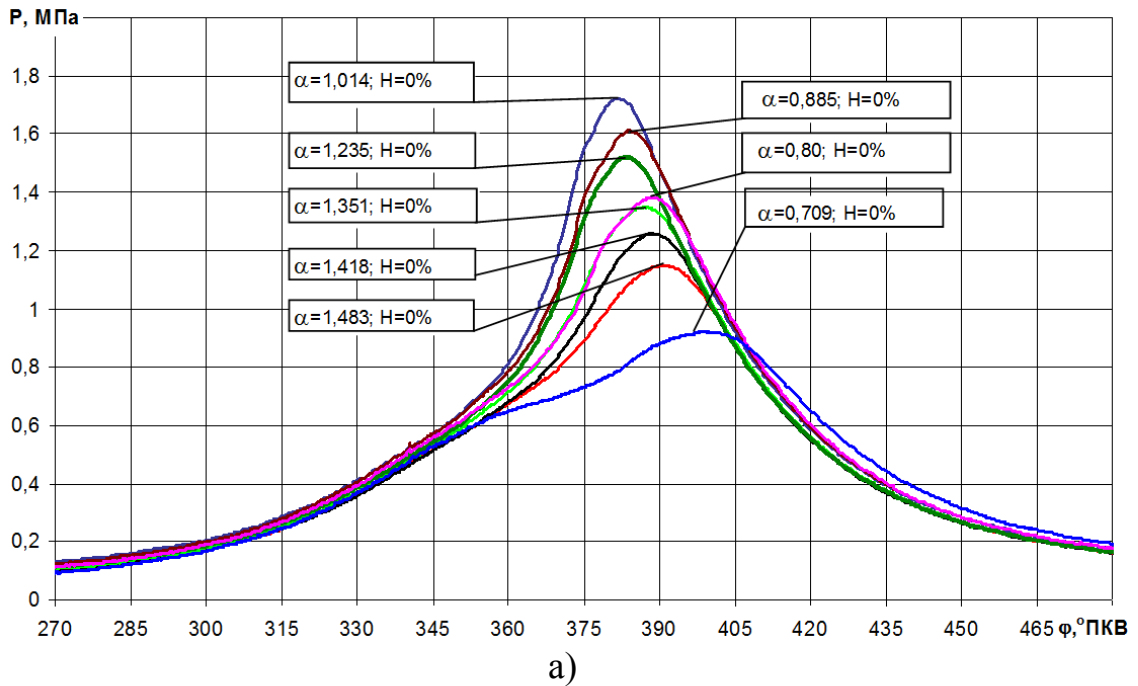
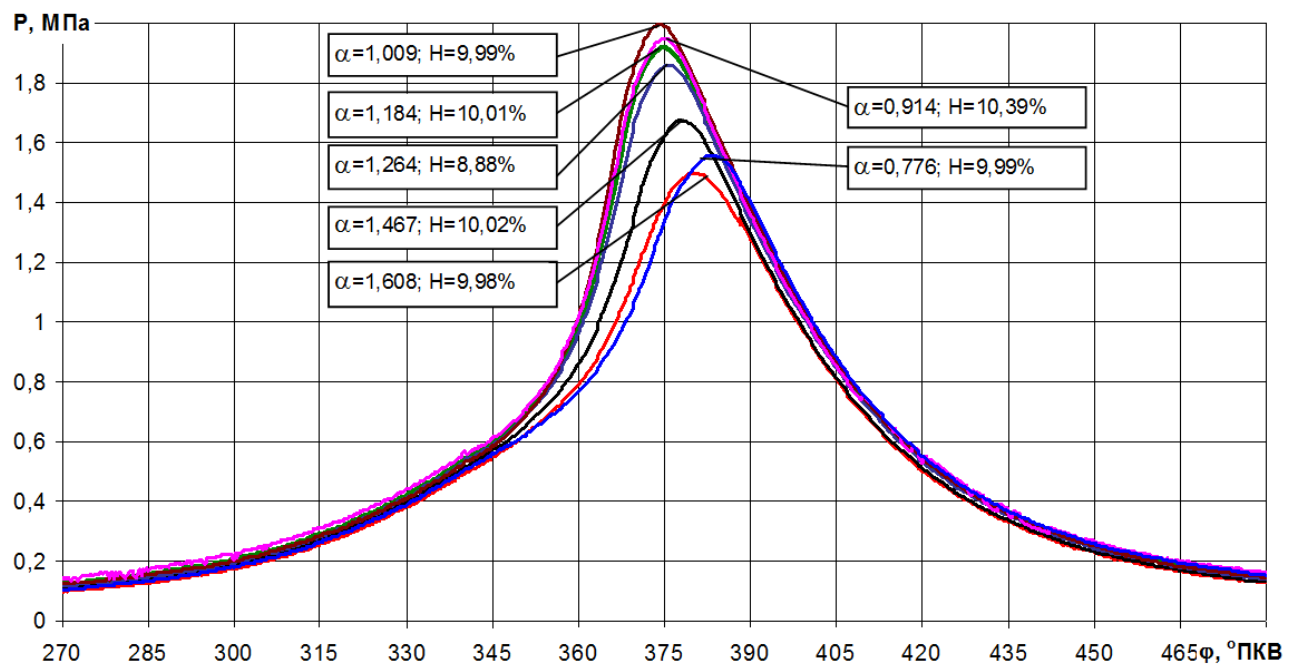
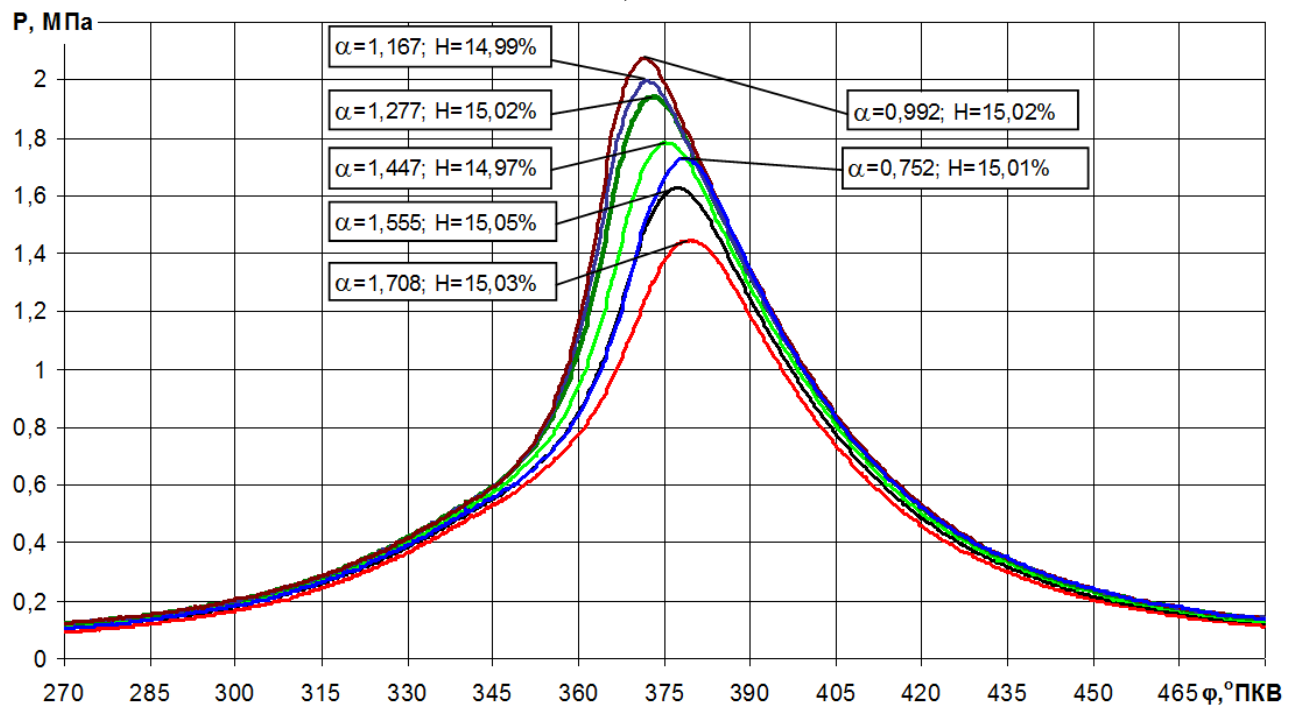


Рисунок 3.3 - Индикаторные диаграммы давления по углу поворота КВ в процессе сгорания при различных коэффициентах избытка воздуха и состава топлива: а) СПГ = 100%; б) СПГ = 95%, H₂ = 5%.



а)

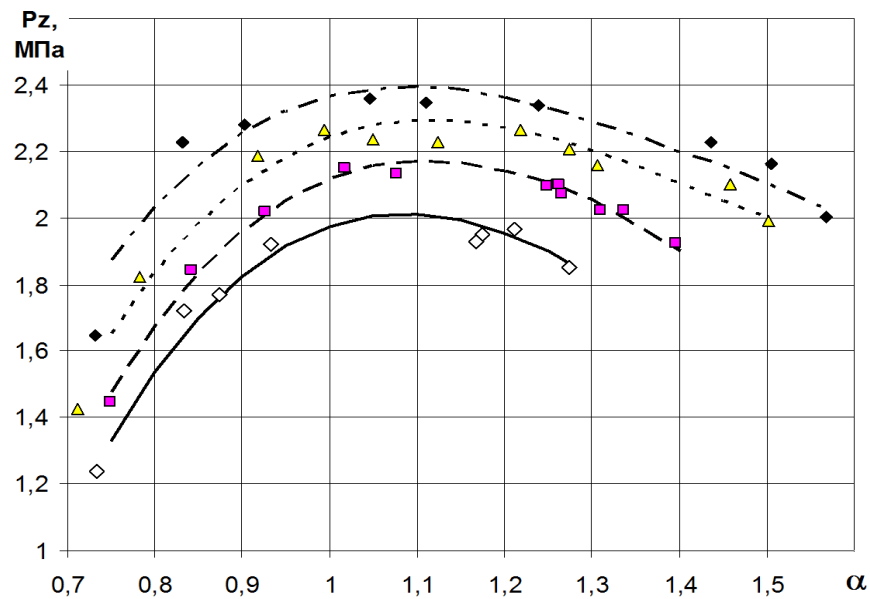


б)

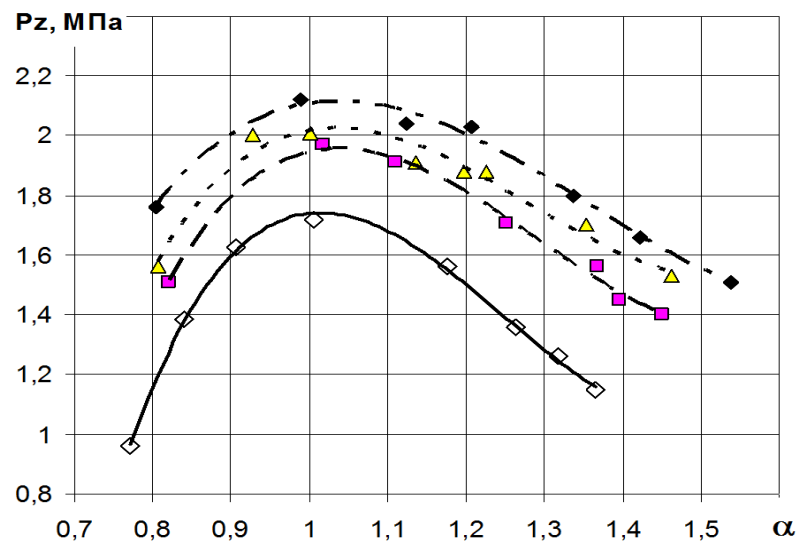
Рисунок 3.4 - Индикаторные диаграммы давления по углу поворота КВ в процессе сгорания при различных коэффициентах избытка воздуха и состава топлива: а) СПГ= 90%, H₂ = 10%.; б) СПГ = 85%, H₂ = 15%.

Из рисунка 3.5 видно, что при массовой доле 5% водорода в композитном топливе, максимальное давление в процессе сгорания повышается примерно на 0.2 МПа, в то время, как при увеличении доли

водорода ещё на 5% максимальное давление повышается в среднем еще на 0.1 МПа.



а)



б)

- ◇ СПГ=100%; Н=0%; ▲ СПГ=90%; Н=10%;
- СПГ=95%; Н=5%; ◆ СПГ=85%; Н=15%;

Рисунок 3.5 – Взаимосвязь максимального давления в камере сгорания установки УИТ-85 с α

Проведенный анализ индикаторных диаграмм давления показал, что индикаторная работа в цилиндре двигателя УИТ-85 увеличивается при

увеличении доли водорода в композитном газовом топливе, что показано на рисунке 3.6.

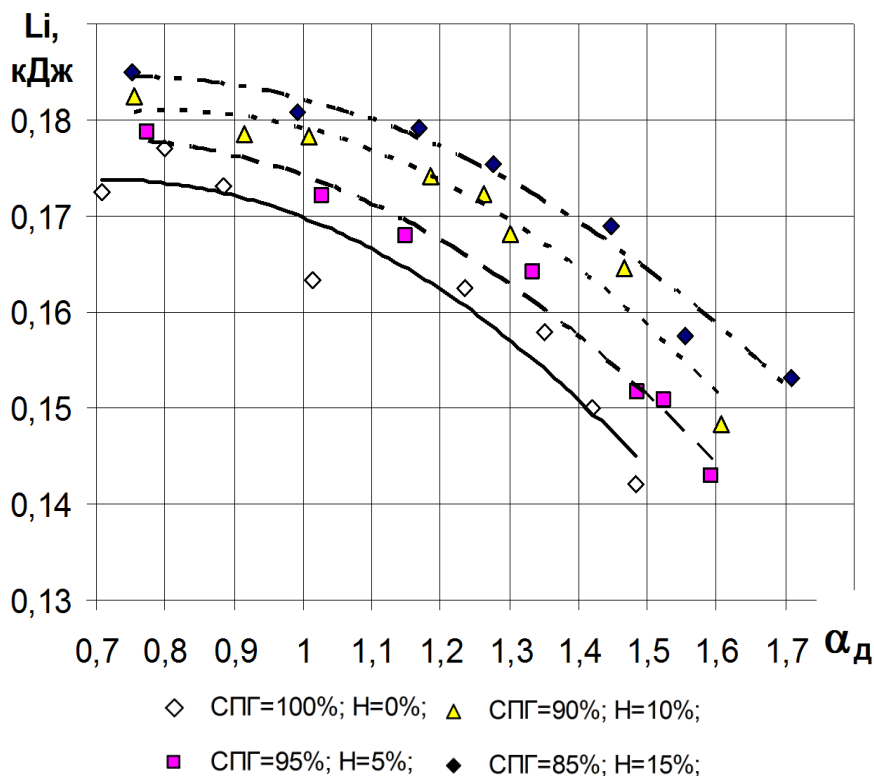


Рисунок 3.6 – Зависимости индикаторной работы в камере сгорания установки УИГ-85 от α

Проведена оценка изменения давления в конце впуска P_a (рисунок 3.7) и коэффициента наполнения η_v от коэффициента избытка воздуха (рисунок 3.8). Анализ давления в конце впуска выявил, что увеличение доли водорода несколько повышает его в среднем на 0,001 и на 0,003 МПа для 900 и 600 мин⁻¹ соответственно, что связано с уменьшением разрежения во впускном канале, но, в тоже время, добавка водорода снижает коэффициент наполнения, вытесняя часть воздуха, что отражено на рисунке 3.8.

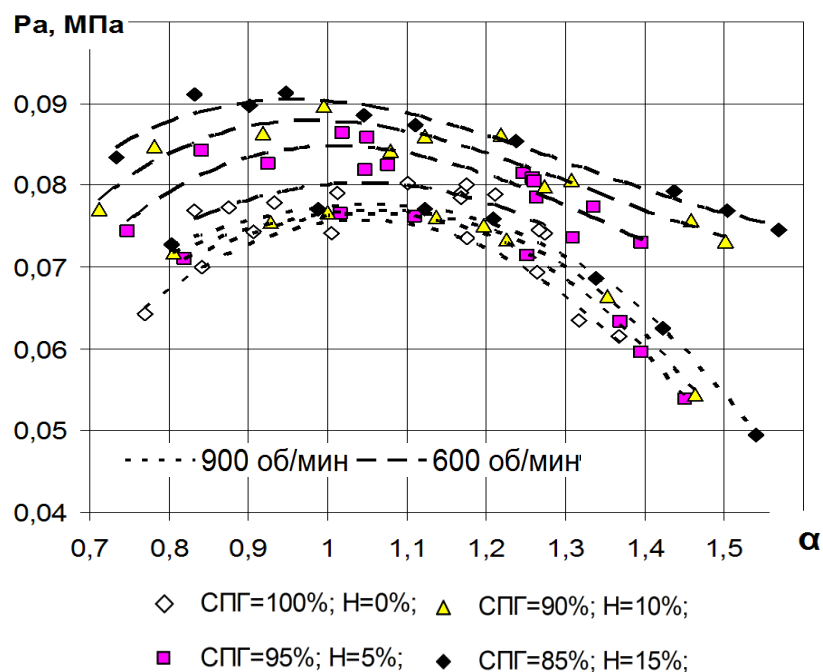


Рисунок 3.7 – Зависимость давления в конце впуска P_a для установки УИТ-85 от α

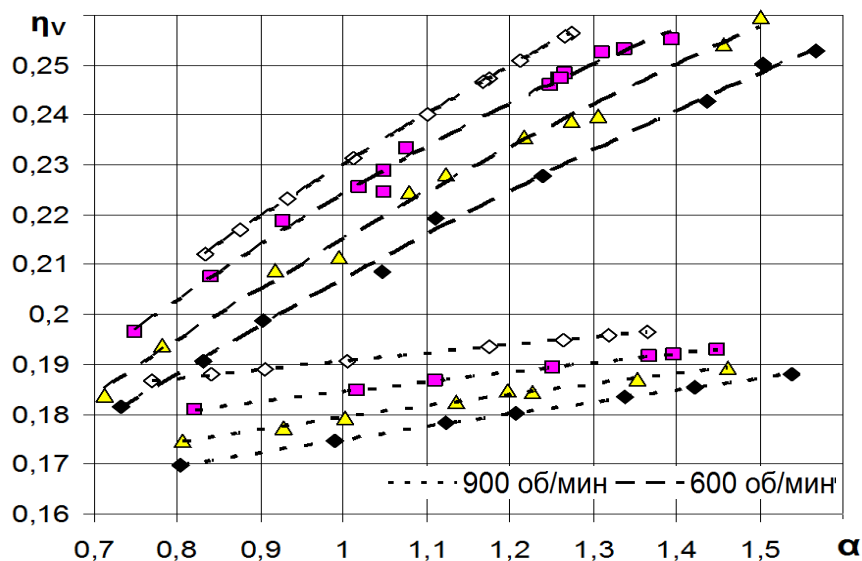


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента наполнения для установки УИТ-85 от α

Также проведена оценка зависимости подведенной теплоты от коэффициента избытка воздуха и частоты вращения (рисунок 3.9), показавшая, что с увеличением доли водорода в композитном топливе доля подведенной теплоты снижается, как для 600, так и для 900 мин⁻¹.

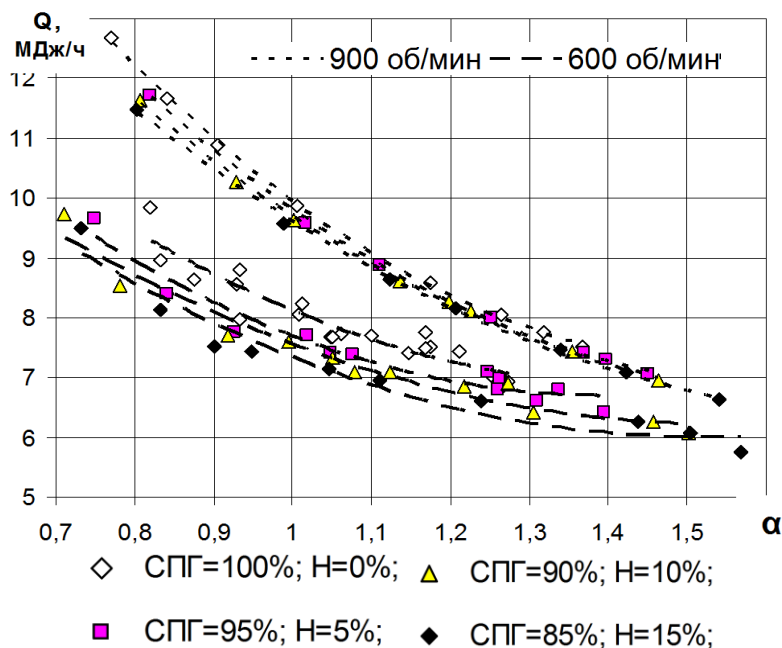


Рисунок 3.9 – Взаимосвязь количества подведенной теплоты в цилиндре двигателя УИТ-85 от α

3.3 Экспериментальные исследования на двигателе ВАЗ-2111

Полученные, в результате эксперимента, регулировочные характеристики представлены на рисунке 3.17.

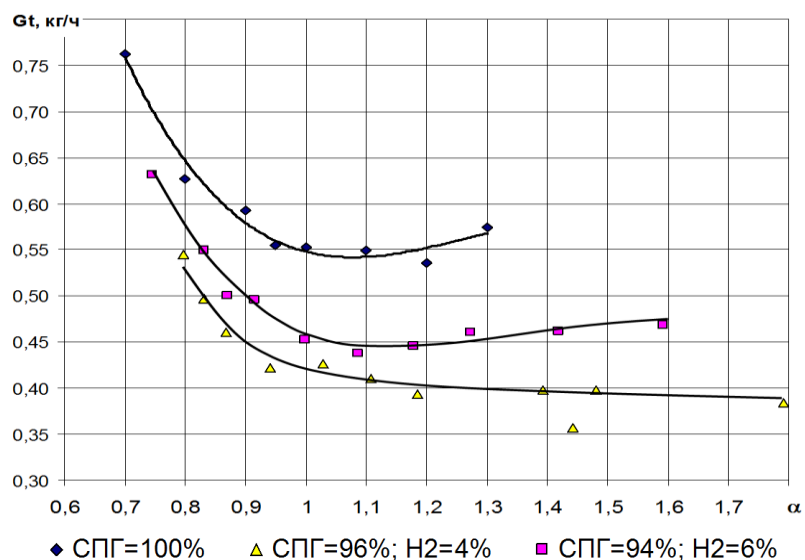


Рисунок 3.10 – Регулировочные характеристики по составу смеси от α , при $n = 880 \text{ мин}^{-1}$, УОЗ - оптимальный по расходу газа

Из рисунка 3.10 видно, что увеличение доли водорода существенно сокращает расход газа при всех составах ТВС.

Для оценки влияния добавки водорода на энергетические показатели двигателя, на рисунке 3.11 представлена зависимость подведенной теплоты в цилиндр ДВС с топливом от коэффициента избытка воздуха α .

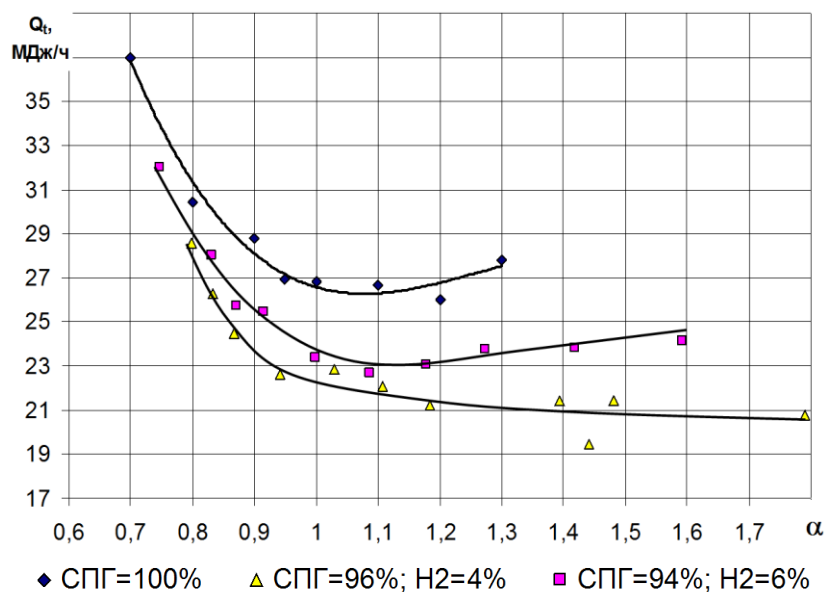


Рисунок 3.11 – Зависимость подведенной теплоты от коэффициента избытка воздуха для двигателя ВАЗ-2111 на режиме ХХ, при $n = 880 \text{ мин}^{-1}$, УОЗ - опт

На рисунке 3.12 представлена взаимосвязь максимального давления в цилиндре двигателя от коэффициента избытка воздуха при работе на композитном топливе с долей водорода 0 и 6% для двигателя ВАЗ-2111 в режиме холостого хода, при 880 мин^{-1} и УОЗ_{опт} - оптимальный по расходу газа угол опережения зажигания, в среднем для природного газа 38°ПКВ , а для композитного топлива с долей водорода приближается к 30°ПКВ . Из рисунка видно, что увеличение доли водорода снижает максимальное давление в цилиндре двигателя на составах смеси от богатых до $\alpha = 1.35$.

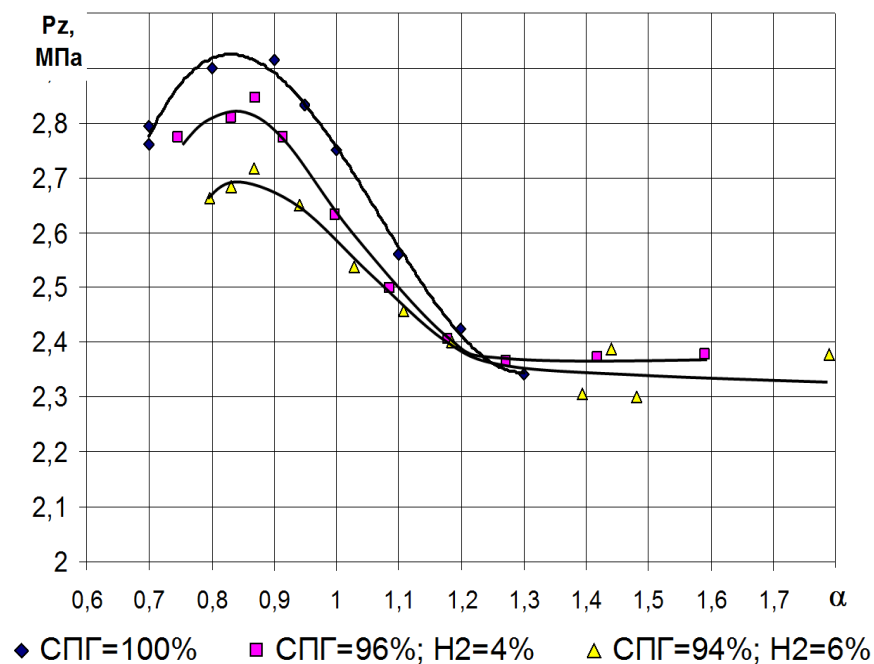


Рисунок 3.12 – Взаимосвязь максимального давления в цилиндре двигателя от α при работе на комPOSITEM топливе с долей водорода 0 и 6% для двигателя ВАЗ-2111 в режиме ХХ, при 880 мин^{-1} и УОЗопт

При этом, на участке по составу смеси от 0,8 до 1,1 снижение максимального давления в среднем составляет 0,15 МПа, это объясняется тем, что добавка водорода снижает неравномерность работы двигателя по цилиндрам, а, следовательно, и связанные с этим потери мощности.

Для оценки влияния добавки водорода в углеводородное топливо на характеристики рабочего процесса и скорость распространения пламени, проведена обработка полученных результатов экспериментальных исследований на двигателе ВАЗ-2111 на режиме холостого хода с пластиной, оборудованной датчиками ионизации [69,72]. Оценка влияния изменения доли водорода и СПГ в комPOSITEM топливе на процесс сгорания и экономические показатели двигателя определялся на трех различных расходах водорода: 0, 0,02 и 0,03 кг/ч, что соответствовало составу комPOSITEM топлива СПГ = 100% и массовой доле водорода 4 и 6%. При этом, производилось снятие регулировочных характеристик ДВС по составу смеси, изменение которого осуществлялось в диапазоне коэффициентов

избытка воздуха от 0,7 до 1,3. Частота вращения коленчатого вала поддерживалась постоянной и равнялась 880 мин^{-1} , что соответствует частоте вращения холостого хода. Угол опережения зажигания выбирался оптимальным по минимальному расходу природного газа.

Полученные в результате эксперимента регулировочные характеристики представлены на рисунке 3.13.

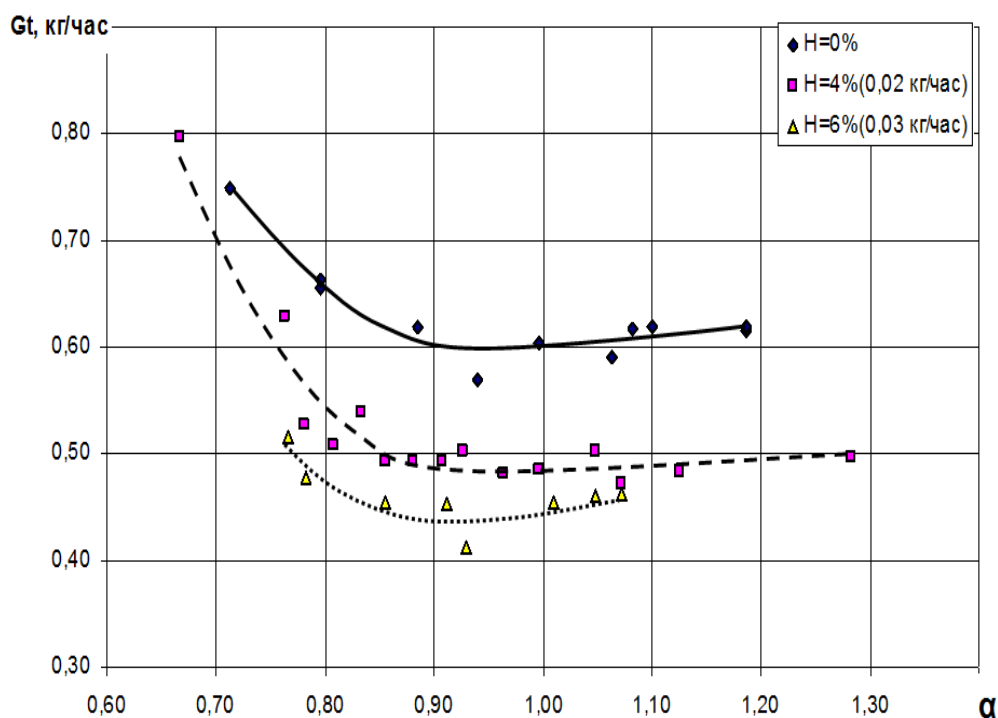


Рисунок 3.13 – Регулировочная характеристика по составу смеси, при $n = 880 \text{ мин}^{-1}$, УОЗ=опт

На рисунке 3.14 представлена зависимость изменения средней скорости распространения фронта пламени от коэффициента избытка воздуха и состава композитного топлива в двигателе ВАЗ-2111, оборудованного переходной пластиной для измерения скорости сгорания.

Полученные результаты представлены в виде зависимости изменения средних скоростей распространения фронта пламени на участке от свечи зажигания до первого датчика ионизации, расположенного в 15 мм от нее (V1) и на участке от свечи зажигания до второго датчика ионизации, установленного у выпускного клапана в 45 мм от нее (V2).

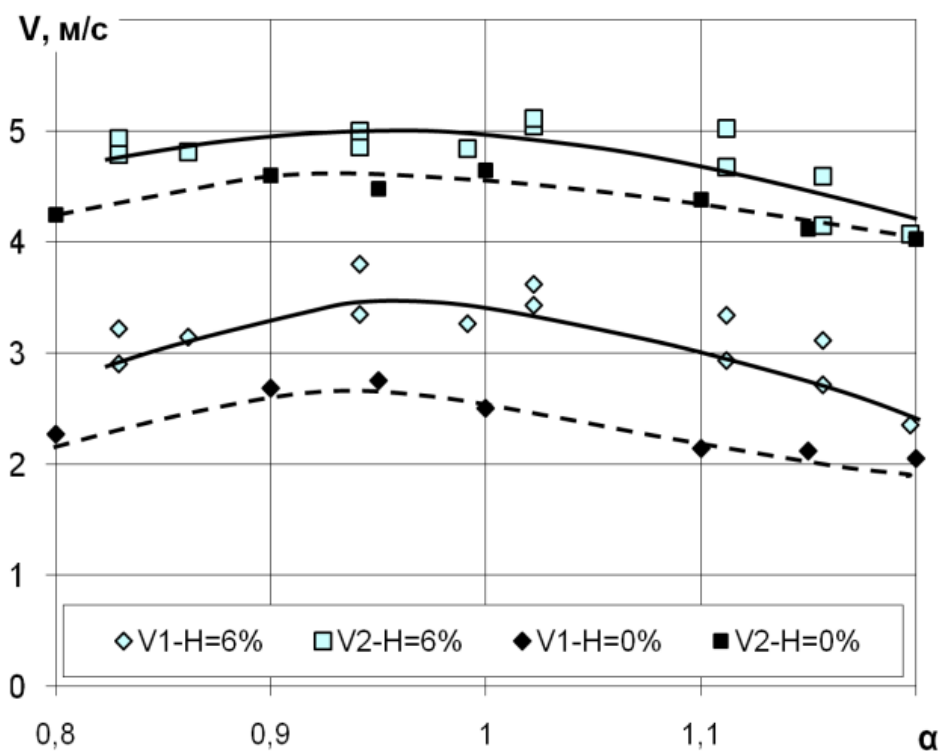


Рисунок 3.14 – Средняя скорость распространения фронта пламени при работе на СПГ и при добавке 6% водорода: V1 - на участке от свечи зажигания до первого датчика ионизации; V2- на участке от свечи зажигания до второго датчика ионизации

Из рисунка 3.14 видно, что средняя скорость распространения фронта пламени выше на участке от свечи зажигания до второго электрода V₂, установленного у выпускного клапана в 45 мм от свечи зажигания, это объясняется большим вкладом скорости распространения пламени в 1-й фазе во 2-ю фазу сгорания. Как показали исследования, время прихода сигнала на электрод у выпускного клапана соответствует либо времени Pz или времени после Pz, что говорит о том, что пламя достигает второго электрода в завершающей стадии сгорания. В тоже время, в среднюю скорость распространения фронта пламени, на участке от свечи зажигания до 1 датчика ионизации, расположенного под ней в 15 мм, вносит основной вклад время развития устойчивого очага горения.

Глава 4 Оценка возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа на режимах глубокого дросселирования

Анализ процесса сгорания газового топлива, состоящего из сжатого природного газа при добавке водорода в размере 5, 10 и 15% (по массе топлива) с коэффициентом избытка воздуха близким к стехиометрическому проводился на установке УИТ-85. В результате проведенных экспериментов были получены серии осциллограмм на каждом режиме испытаний. В каждом режиме была выбрана одна характерная индикаторная диаграмма по которой и проводился термодинамический анализ процесса сгорания. Это было оправдано высокой равномерностью протекания процесса сгорания, что подтверждается осциллограммами давления, приведенными на рисунке 4.1.

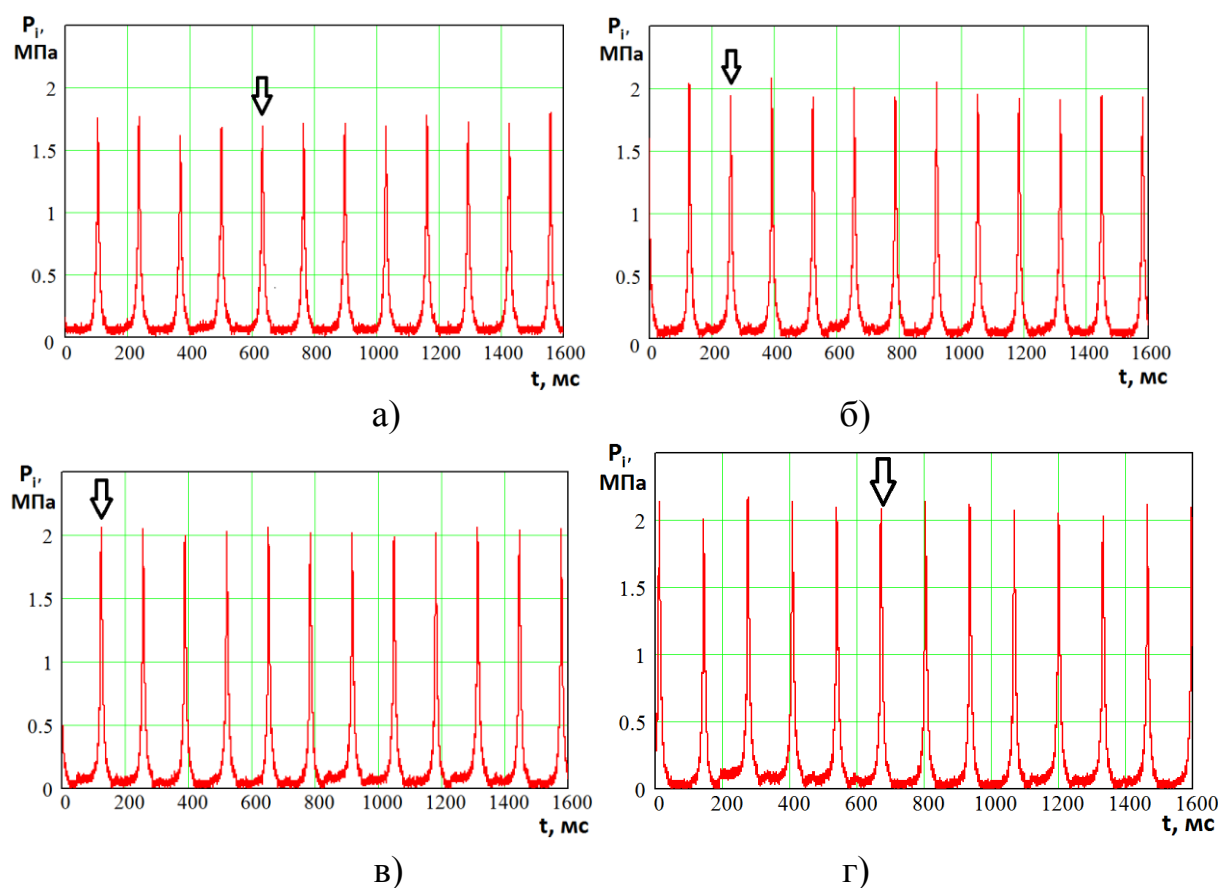


Рисунок 4.1 – Осциллограммы изменения давления в УИТ-85: (а) СПГ=100%, $\alpha = 1,0052$; (б) СПГ=95,1%, $H_2=4,99\%$, $\alpha = 1,0168$; (в) СПГ=90,01%, $H_2=9,99\%$, $\alpha = 1,009$; (г) СПГ=84,98%, $H_2=15,02\%$, $\alpha = 0,9884$

Оценка влияния водорода на термодинамические показатели рабочего процесса проведена по предложенной методике для состава смеси близкого к стехиометрическому, как наиболее востребованному, в связи с применением трехкомпонентных каталитических нейтрализаторов, которые эффективно работают в этом диапазоне, при работе на природном газе и при добавке 4,99, 9,99 и 15,02% водорода по массе топлива. Результаты обработки экспериментальных данных для каждого состава смеси представлены на рисунках 4.2, 4.3, 4.4 и 4.5. На рисунках 4.2, 4.3, 4.4 и 4.5 приведены диаграммы изменения работы, диаграммы изменения внутренней энергии и диаграммы изменения активного тепловыделения, являющегося суммой изменения внутренней энергии и работы с момента начала сгорания. Мы видим, что добавка водорода ускоряет процесс сгорания, выражающийся более быстрым ростом внутренней энергии, и обеспечивает большее количество накопленной энергии, которая при расширении расходуется на совершение работы. Подвод энергии от сгорания при минимальном объеме рабочего тела позволяет повысить эффективность использования введенной с топливом теплоты в цилиндр двигателя. Проводя анализ изменения количества теплоты, затраченной на увеличение внутренней энергии и совершение работы, следует отметить некоторое её уменьшение в конце сгорания, это характеризуется наличием теплоотвода в стенку. Величина теплоотвода на данном участке больше энергии выделяемой топливом в конце процесса сгорания. Общая величина тепловых потерь на теплоотвод в стенку снижается при увеличении количества добавляемого водорода. Это можно оценить разницей максимума активного тепловыделения и энергии, подведенной с топливом.

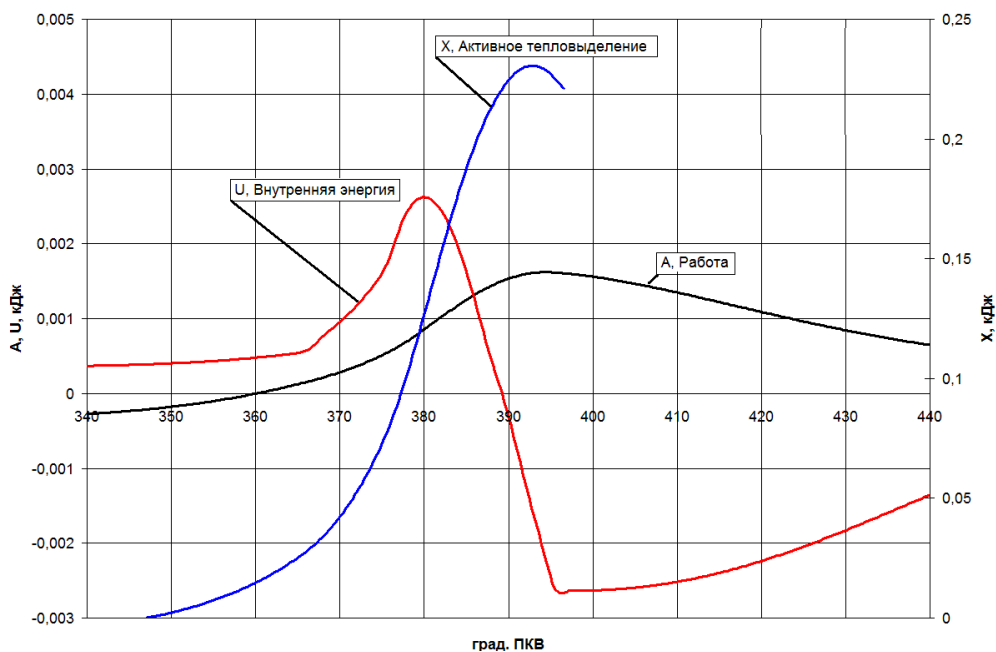


Рисунок 4.2 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания
 $СПГ=100\%$, $\alpha = 1,0052$;

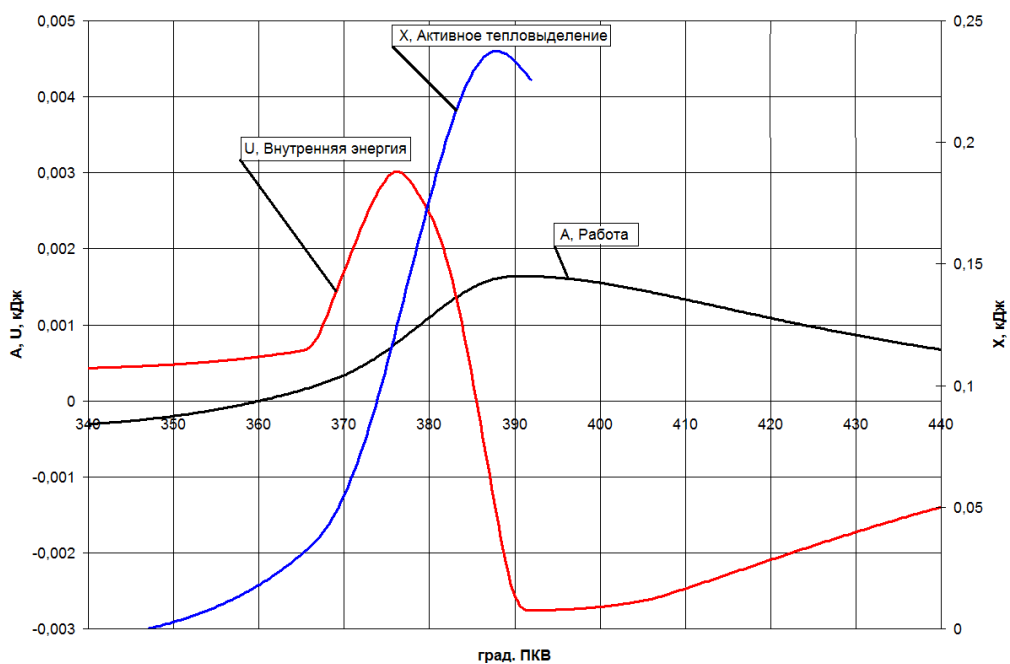


Рисунок 4.3 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания
 $СПГ=95,1\%$, $H_2=4,99\%$, $\alpha = 1,0168$;

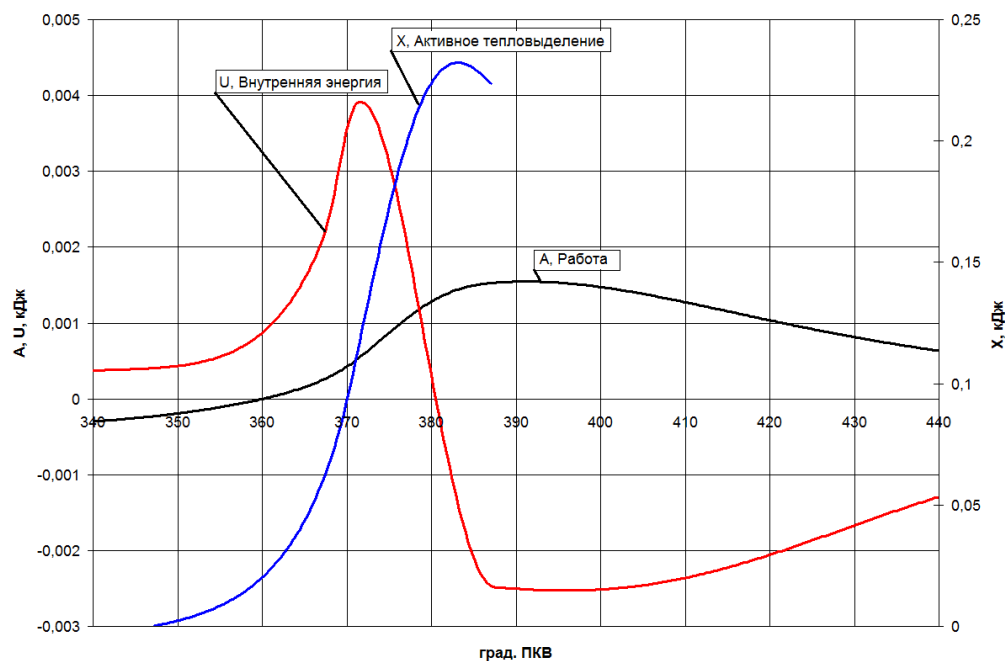


Рисунок 4.4 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания
СПГ=90,01%, H₂=9,99%, α = 1,009

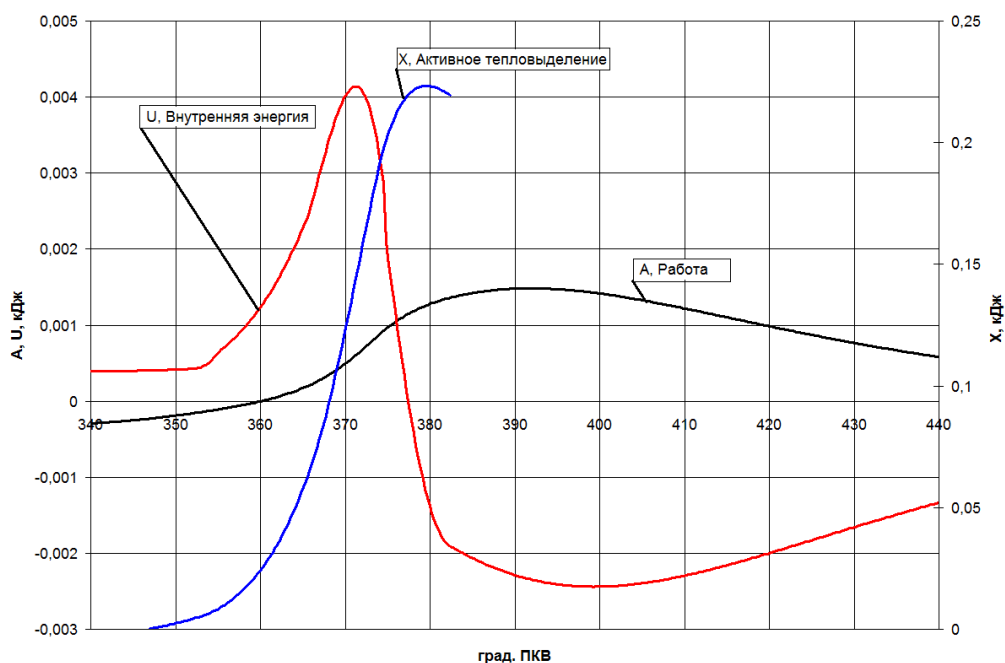


Рисунок 4.5 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания
СПГ=84,98%, H₂=15,02%, α = 0,9884

Для оценки термодинамической эффективности рабочего процесса применяется параметр под названием "доля использованной теплоты", т.е.

отношение активного тепловыделения к полному количеству теплоты введенного с топливом:

$$\xi = \frac{Q_{акт.}}{Q_{цикл}}. \quad (1)$$

Численная оценка влияния водорода на изменение основных термодинамических параметров процесса сгорания приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Изменение основных термодинамических параметров процесса сгорания при добавке водорода в природный газ

α	H ₂ , %	$Q_{цикл}$, кДж	$Q_{акт.}$, кДж	$Q_{нд.}$, кДж	$Q_{пот.}$, кДж	A, кДж с 220 до 480 град. ПКВ	ξ
1,0052	0	0,343111	0,230643	0	0,112468	0,249214	0,672212
1,0168	4,99	0,329956	0,231081	0	0,098875	0,25069	0,70034
1,009	9,99	0,328433	0,232247	0	0,096186	0,251737	0,707137
0,9884	15,02	0,323661	0,231718	0,005277	0,086666	0,25242	0,715927

Общий анализ результатов показал, что добавка водорода в природный газ повышает эффективность процесса подвода теплоты, что выражается в повышении доли использованной теплоты на 5,2% при добавке 10% водорода и на 4,2% при добавке 5% водорода от массы топлива. При этом, за счет более быстрого подвода теплоты при добавке водорода, снижается температура в процессе расширения, что также несколько уменьшает тепловые потери через стенку цилиндра. Сравнение индикаторных диаграмм исследуемых циклов приведено на рисунке 4.6. На рисунке 4.6 мы видим изменение давления при добавке водорода, где показано происходящее при этом снижение энергоемкости топлива. При одинаковых условиях на впуске в цилиндр двигателя поступило 0,343 кДж, а при добавке 10% водорода уже всего 0,328 кДж, следовательно, снижение составило 4,2%. Поэтому

несмотря на повышение термодинамической эффективности процесса сгорания, общее увеличение работы составляет около 1%.

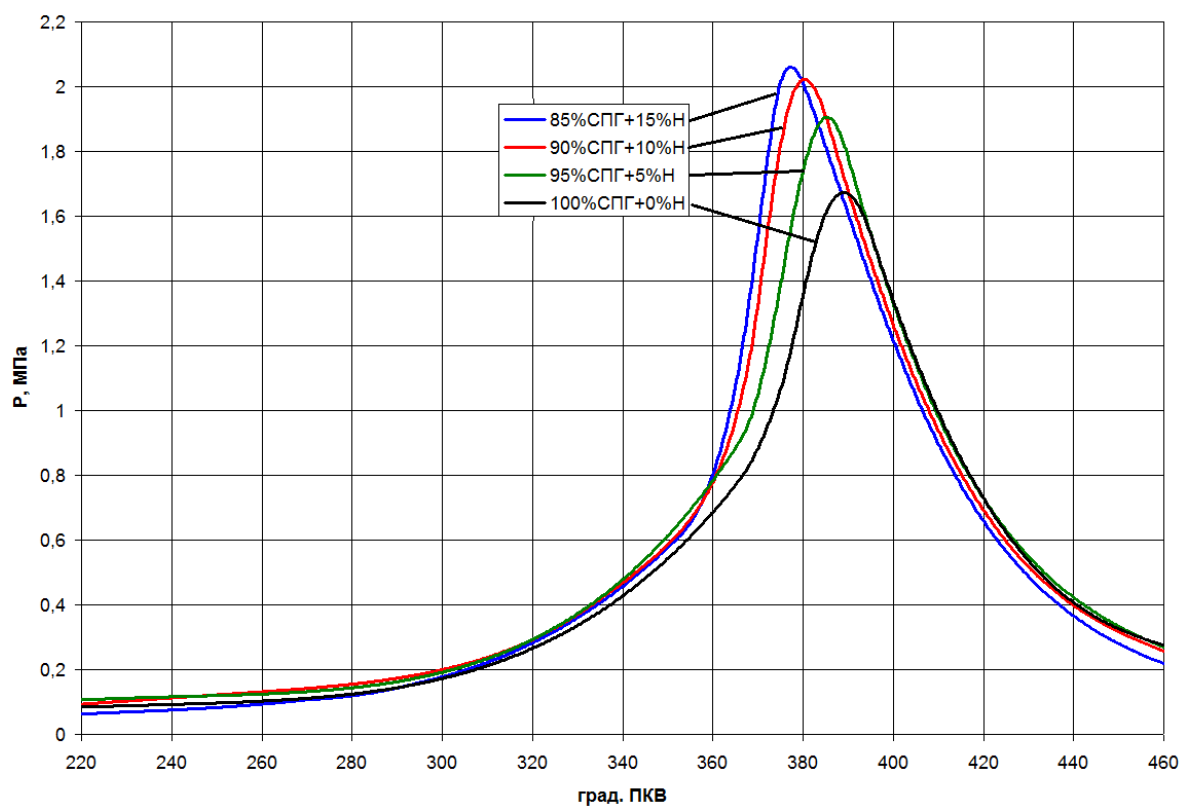


Рисунок 4.6 – Давление в цилиндре двигателя у рассматриваемых циклов

Проведенный анализ термодинамической эффективности рабочего процесса двигателей на природном газе показал, что при добавке водорода в стехиометрическую смесь повышается доля использованной теплоты на 5,2% при добавке 10% водорода и на 4,2% при добавке 5% водорода от массы топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ и обобщение результатов, выполненных по рассматриваемой проблеме исследований позволяют сделать следующее заключение.

Добавка небольшого количества водорода (до 7% от массы основного топлива) к природному газу привносит следующее влияние на процесс сгорания:

- Повышается скорость распространения пламени, как ламинарная, так и турбулентная. При этом с увеличением турбулентности ТВС в процессе сгорания эффективность добавки водорода уменьшается.
- Снижается задержка воспламенения, и общая продолжительность процесса сгорания, что обеспечивает высокую эффективность работы двигателя при повышении частоты вращения.
- Повышение скорости тепловыделения обеспечивает меньшие тепловые потери рабочего процесса, что позволяет получить увеличение мощности, при уменьшении вводимой тепловой энергии в цилиндр двигателя за счет меньшей объемной теплоты сгорания у водорода по сравнению с природным газом.
- Расширяются пределы эффективного обеднения смеси, что позволяет осуществлять качественное регулирование, тем самым, повышая эффективность работы двигателя.
- Более широкий рабочий диапазон обеспечивает снижение токсичности как по CH , так и по NO_x .
- Проведенный анализ термодинамической эффективности рабочего процесса двигателей на природном газе показал, что при добавке водорода в стехиометрическую смесь повышается доля использованной теплоты на 5,2% при добавке 10% водорода и на 4,2% при добавке 5% водорода от массы топлива.

Применение пониженной степени сжатия на режиме холостого хода позволило лучше показать влияние степени дросселирования на показатели

токсичности двигателя. Показано, что не сама степень забалластированности влияет на характер протекания процесса сгорания, а условия образования устойчивого очага горения. Если инициация процесса сгорания произошла успешно, то высокое содержание остаточных газов в рабочей смеси, снижает концентрацию токсичных компонентов в продуктах сгорания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Belogub, A. V. Fuel Supply System Construction of Gasoline/Hydrogen Automobiles [Текст] / A.V. Belogub, G.B. Talda // International Journal of Hydrogen Energy, VoL 16, No. 6, pp. 417-421, 1991.
2. Lee, S.J. Combustion Characteristics of Intake Port Injection Type Hydrogen Fueled Engine [Текст] / S.J. Lee, H.S. Yi, E.S. Kim // International Journal of Hydrogen Energy, VoL 20, No. 4. pp. 317-322, 1995.
3. Al-Gami, M. A Simple and Reliable Approach for the Direct Injection of Hydrogen in Internal Combustion Engines at Low and Medium Pressures [Текст] / International Journal of Hydrogen Energy, VoL 20, No. 9, pp. 723-726,1995.
4. Homan, H.S. The Effect of Fuel Infection on NO_i Emissions and Undesirable Combustion for Hydrogen-rueled Piston Engines [Текст] / H.S. Homan, P.C.T. De Boer, W.J. Mclean // International Journal of Hydrogen Energy, VoL 8, No. 2, pp. 131-146, 1983.
5. Green, R. K. High-pressure Hydrogen Injection for Internal Combustion Engines [Текст] / R.K. Green, N.D. Glasson // International Journal of Hydrogen Energy, VoL 17, No. 11, pp.895-901,1992
6. Glasson, N. D., and Green, R. K.: "Performance of a Spark-ignition Fueled with Hydrogen using a High-pressure Injector [Текст] / N.D. Glasson, R.K. Green // International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19, No. 11, pp. 917-923,1994.
7. Williamson, M. H. Wiring diagram of Injection Control Unit [Текст] / Private Communication, 2001.
8. Suwanchotchoung, N. Development of a Test Facility foe Evaluation of a Dual Fueled, Single-Cylinder, Spark Ignition Engine [Текст] / Vanderbilt University Graduate School, M. Sc. Thesis, May 1995.

9. Gurtner, D.M. Performance and Emission Effects of Propane as a Secondary Fuel of a Single-Cylinder, Spark Ignition Engine [Текст] / Vanderbilt University Graduate School, M. Sc Thesis, May 1997.
10. Wallington, T.J. Automotive fuels and internal combustion engines: a chemical perspective [Текст] / T. J. Wallington, E. W. Kaiser, J. T. Farrell // The Royal Society of Chemistry – 2006. – Vol. 35. – P. 335–347. – DOI: 10.1039/B410469M
11. Das, L.A comparative evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative fuels [Текст] / L. Das, R. Gulati, P. Gupta // International Journal of Hydrogen Energy. – 2000. – Vol. 25(8). – P. 783-93. – doi:10.1016/S0360-3199(99)00103-2
12. Ranjan, R. Emission characteristic of hydrogen and gasoline blend in spark-ignited engine / R. Ranjan, R.K. Tyagi [Текст] // International Journal of Ambient Energy. – 2015. – DOI: 10.1080/01430750.2015.1023840
13. Das, L.M. Hydrogen engine: research and development programmes in Indian Institute of Technology [Текст] / L.M. Das // Delhi, International Journal of Hydrogen Energy. – 2002. – Vol. 27(9). – P.953-65. – doi:10.1016/S0360-3199(01)00178-1
14. Unich, A. The impact of natural gas – hydrogen blends on internal combustion engines performances and emissions [Текст] / A. Unich, B. Morrone, A. Mariani // SAE paper. – 2009. – Vol. 2009-24-0102. – DOI: [10.4271/2009-24-0102](https://doi.org/10.4271/2009-24-0102)
15. Sierens, R. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions [Текст] / R. Sierens, E. Rosseel // Eng. Gas Turbines Power. – Vol. 122(1). – P. 135-40 – doi:10.1115/1.483191
16. Mohammed, S.E. Analysis of engine characteristics and emissions fueled by in-situ mixing of small amount of hydrogen in CNG [Текст] / S.E. Mohammed, M.B. Baharom, A.R. Aziz // International Journal of Hydrogen

- Energy. – 2011. Vol. 36(6). – P. 4029-37. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.12.065}
17. Ma, F. Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas [Текст] / F. Ma, Y. Wang, H. Q. Liu, Y. Li // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – Vol. 32 – P. 5067–75. – DOI: [10.1016/j.ijhydene.2007.07.048](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.048)
 18. Wallace, J.S. Hythane and CNG fuelled engine exhaust emission comparison [Текст] / J.S. Wallace, A.I. Cattelan // Proceedings 10th World Hydrogen Energy Conference. – 1994. – P. 1761–1770.
 19. Al-Janabi, H. A prediction study of the effect of hydrogen blending on the performance and pollutants emission of a four stroke spark ignition engine [Текст] / H. Al-Janabi, S. Al-Baghdadi // International Journal of Hydrogen Energy. – 1999. – Vol. 24. – P. 363–75.
 20. Chatterjee, A. Combustion performance and emission characteristics of hydrogen as an internal combustion engine fuel [Текст] / A. Chatterjee, S. Dutta, B. K. Mandal // Journal of Aeronautical and Automotive Engineering (JAAE). – 2014. – Volume 1, Number 1; September. – P. 1-6
 21. Tinaut, F.V. Prediction of performance and emissions of an engine fuelled with natural gas/hydrogen blends [Текст] / F.V. Tinaut, A. Melgar, B. Gimenez, M. Reyes // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. – Vol. 36. – P. 947–56. – <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.025>
 22. Andrea, T. D. Formation and restraint of toxic emissions in hydrogen-gasoline mixture fuelled engine [Текст] / T. D. Andrea, P. F. Henshaw, D. S. K. Ting // International Journal of Hydrogen Energy. – 1998. – Vol. 23. – P. 971–5. – [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00141-9](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00141-9)
 23. Ji, C. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions [Текст] / C. Ji, , S. Wang // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – Vol. 34. – P. 7823–34. – DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.06.082](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.082)

24. Zervas, E. Influence of fuel and air/fuel equivalence ratio on the emission of hydrocarbons from a SI engine [Текст] / E. Zervas, X. Montagne, J. Lahaye // Fuel. – 2004. – Vol. 83(17-18). – P. 2301-2311. – DOI: [10.1016/j.fuel.2004.06.029](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.06.029)
25. Smolenskaya, N.M. Research of polytropic exponent changing for influence evaluation of actual mixture composition on hydrocarbons concentration decreasing on deep throttling operation [Текст] / N.M. Smolenskaya, V.V. Smolenskii, I. Bobrovskij // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 50 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/50/1/012016.
26. Smolenskaya, N.M. Increase in the thermodynamic efficiency of the working process of spark-ignited engines on natural gas with the addition of hydrogen [Текст] / N.M. Smolenskaya, V.V. Smolenskii, N.V. Korneev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 121 (2018) 052009 doi:10.1088/1755-1315/121/5/052009.
27. Li, H. Knock in spark ignition hydrogen engine [Текст] / H. Li, G.A. Karim // International Journal of Hydrogen Energy 2004; 29(8):859-65. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.09.013>
28. Sharma, S. K. Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: A Review of Technical Feasibility [Текст] / S.K. Sharma, P. Goyal, R.K. Tyagi // International Journal of Performability Engineering, Vol. 11, No. 5, September 2015, pp. 491-501.
29. Xu, J. Experimental Study of a Single Cylinder Engine Fueled with Natural Gas – Hydrogen Mixtures [Текст] / J. Xu, X. Zhang, J. Liu, L. Fan // International Journal of Hydrogen Energy 35(7) (2010) 2909-2914. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.05.039](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.039)
30. Kahraman, E. An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine [Текст] / E. Kahraman, S.C. Ozcanlı, B. Ozerdem // International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 2066 – 2072. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2012.09.037](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.037)
31. Русаков, М.М., Оценка токсичности бензинового двигателя при добавках водорода в режимах пуска и прогрева [Текст] / М.М. Русаков, Л.Н.

- Бортников, А.Н. Афанасьев, Д.А. Павлов // Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал «Автотракторное электрооборудование», № 1, 2005.
32. Павлов, Д.А., Токсичность автомобиля ВАЗ-21102 при добавке водорода на режимах пуска и прогрева [Текст] / Д.А. Павлов, Л.Н. Бортников, А.Н. Афанасьев, М.М. Русаков, В.А. Тимчук, В.Е. Лукашев // Международный симпозиум «Образование через науку»: Сб. научных трудов - Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
33. Русаков, М.М., Водород и ДВС автомобиля [Текст] / М.М. Русаков, Д.А. Павлов, А.П. Шайкин, Л.Н. Бортников, А.Н. Афанасьев // Международная научно-техническая конференция «Рабочие процессы и технология двигателей»: Сб. статей - Казань, КГТУ им. А.Н. Туполева, Институт авиации, наземного транспорта и энергетики, 2005.
34. Ивашин, П.В., Взаимосвязь ионного тока в камере сгорания бензинового ДВС и концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах [Текст] / П.В. Ивашин, А.П. Шайкин // Наука производству, №5, М., 2005. С. 10-12.
35. Кульчицкий, А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие [Текст] / А.Р. Кульчицкий // Владимирский гос. университет. Владимир, 2000.
36. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени [Текст] / перевод с англ. Ю.Ф. Дитякина // Машиностроение. М. 1981.
37. Воинов, А.И, Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях [Текст] / А.И. Воинов // М.: Машиностроение. 1977.
38. Асмус, Т.У. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями [Текст] / Т.У. Асмус, К. Бргннакке и др.; под ред. Д.Хиллиарада, Дж.С. Спрингера; перевод с англ. Васильева; под ред. А.В. Кострова // – М.: Машиностроение, 1988.
39. Основы горения углеводородных топлив [Текст] / перевод с англ. под ред. Л.И. Хитрина и А.И. Попова // – Изд. иностр. литературы. – 1960

40. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. Изд.: Ч.1: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда // Металлургия, 1988.
41. Иссерлин, А.С. Основы сжигания газового топлива [Текст] / А.С. Иссерлин // Справ. Пособие. - Л.: 1987
42. Звонов, В.А., Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.А. Звонов // М.: Машиностроение, 1981.
43. Жегалин, О.И., Снижение токсичности автомобильных двигателей [Текст] / О.И. Жегалин, П.Д. Лукачев // - М.: Транспорт, 1985.
44. Ивашин, П.В., Электропроводность пламени, средняя скорость сгорания и концентрация несгоревших углеводородов в ОГ бензиновых двигателей [Текст] / П.В. Ивашин, П.В. Коломиец, А.П. Шайкин, В.И. Строганов // Автотракторное электрооборудование № 1-2, 2004, с. 38 – 39.
45. Степанов, Е.М., Ионизация в пламени и электрическое поле [Текст] / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков // М.: Металлургия, 1968.
46. Аравин, Г.С., Ионизация пламенных газов в условиях бомбы и двигателя [Текст] / Г.С. Аравин // Дис. ИХФ АН СССР, 1952.
47. Иноземцев, Н.В., Процесс сгорания в двигателях [Текст] / Н.В. Иноземцев, В.К. Кошкин, Под Общ. ред. Н.В. Иноземцева // М.: изд-во 1-я тип. Машгиза в Лгр., 1949
48. Ивашин, П. В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока [Текст]: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.04.02 / П. В. Ивашин // Тольятти, 2004. - 23 с.
49. Смоленский, В.В. Особенности процесса сгорания в бензиновых двигателях при добавке водорода в топливно-воздушную смесь [Текст]: автореферат дис. кандидата технических наук : 05.04.02 / В. В. Смоленский - Тольятти, 2007. - 20 с.
50. Ивашин, П.В., Взаимосвязь электропроводности пламени и показателя сгорания в бензиновых двигателях [Текст] / П.В. Ивашин, П.В. Коломиец,

- В.В. Смоленский, А.П. Шайкин // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров. Материалы 49-ой МНТК ААИ. 23-24 марта, 2005г. МГТУ «МАМИ». – М: 2005. – С. 94-99
51. Stocky, J. F. An Examination of the Performance of Spark Ignition Engines Using Hydrogen-Supplemented Fuels [Текст] / J. F. Stocky, M. W. Dowdy, T. G. Vanderbrug // California Institute of Technology. SAE paper No. 750027. 1975.
52. Sher, E. Measurement and Predictions of the Performance and Emissions of a SX Engine Fueled With Hydrogen-Enriched Gasoline [Текст] / E. Sher, Y. Hacohen // Beer Sheva, Israel, 1988.
53. Elemam, S. H. A Study on the Combustion of Alternative Fuels in Spark-Ignition Engines [Текст] / S. H. Elemam, A.A. Desoky // International Journal of Hydrogen Energy, Vol 10, No. 7-8, pp. 497-504, 1985
54. Shudo, T. Thermal Efficiency Analysis in a Hydrogen Premixed Combustion Engine [Текст] / T. Shudo, Y. Nakajima, T. Futakuchi // JSAE Review, Vol 21, pp. 177-182, 2000.
55. Das, L. Exhaust Emission Characterization of Hydrogen-Operating Engine System: Nature of Pollutants and Their Control Techniques [Текст] / International Journal of Hydrogen Energy, Vol 16, No. 11, pp. 765-775, 1991.
56. Hansel, J.G. Safety Considerations in the Design of Hydrogen-powered Vehicles [Текст] / J.G. Hansel, G.W. Mattem, R.N. Miller // International Journal of Hydrogen Energy, Vol 18, No. 9, pp. 783-790, 1993.
57. Das, L. M. Fuel Induction Techniques For a Hydrogen Operated Engine [Текст] / International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 11, pp. 833-842, 1990.
58. Das, L. M. Performance evaluation of a hydrogen-fueled spark ignition, engine using electronically controlled solenoid-actuated injected system [Текст] / L.M. Das, R. Gulad, P.K. Gupta, // International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 25, pp. 569-579, 2000.

59. Shehata, M. S. Cylinder pressure, performance parameters, heat release , specific heats ratio and duration of combustion for spark ignition engine [Текст] / Energy, vol. 35, no. 12, pp. 4710–4725, 2010.
60. Djouadi, A. Combustion study of a spark-ignition engine from pressure cycles [Текст] / A. Djouadi, F. Bentahar // Energy, 101, 211–217, 2016.
61. Yuan, C. An experimental research on the combustion and heat release characteristics of a free-piston diesel engine generator [Текст] / C. Yuan, H. Feng, Y. He // Fuel, vol. 188, pp. 390–400, 2017.
62. Smolenskaya, N.M. Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel [Текст] / N.M. Smolenskaya, N.V. Korneev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.