

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 Особенности применение водорода для повышения эффективности
процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода

Студент(ка)

Д.С. Масленников

(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.....	3
ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке наличия особенности применение водорода для повышения эффективности процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода	6
1.1 Обзор литературы по проблемам с работой двигателя при добавке водорода	6
1.2 Методы подачи водорода в ДВС	11
1.3 Эффективность работы двигателя при добавке водорода.....	13
1.4 Токсичность работы двигателя при добавке водорода	14
1.5 Двухтопливный режим работы двигателя при добавке водорода	15
1.6 Получение водорода при электролизе воды	18
1.7 Небольшой патентный обзор существующих запатентованных решений по применению добавок водорода в автомобильных двигателях	21
ГЛАВА 2 Описание экспериментального оборудования	31
2.1 Экспериментальная установка	32
2.2 Датчики, применяемые при исследованиях	38
ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью выявления особенности применение водорода для повышения эффективности процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода	46
3.1 Результаты экспериментальных исследований	46
ГЛАВА 4 Выявление возможности повышения эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода ..	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Снижение токсичности отработавших газов бензиновых двигателей с искровым зажиганием, является важным условием развития автомобилестроения. Постоянное ужесточение норм токсичности определяется необходимостью снизить экологическую напряженность при активном использовании автотранспорта в крупных городах.

Многими исследователями показано, что водород, в качестве добавки в углеводородное топливо, обладает рядом свойств, позволяющих по-новому организовать рабочий процесс двигателей с искровым зажиганием. А именно, значительно повысить их экономичность и снизить токсичность отработавших газов. Также известно, что эффективность процесса сгорания в ДВС, в первую очередь, зависит от закона подвода теплоты. В качестве топлива для двигателя внутреннего сгорания водород оказался очень взрывоопасным веществом, и необходимо учитывать безопасность. Из-за его низкой энергии воспламенения предварительная зажигания является серьезной проблемой. Небольшое расстояние гашения позволяет пламени проходить через узкие отверстия (впускные и выпускные клапаны будут иметь такие отверстия), а пламя - во впускной коллектор. Детонация двигателя со стехиометрическими или богатыми смесями является еще одним аспектом, который, по-видимому, довольно распространен для двигателей, работающих на чистом водороде. Но эта же характеристика позволяет работать с обогащенным водородом бензиновым двигателем, работающим в сверхтекучем состоянии без детонации, вспышки или пропусков зажигания [2].

Целью работы является выявление особенностей применения водорода для повышения эффективности процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода.

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

1. провести оценку наличия особенности применение водорода для повышения эффективности процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода
2. выявить возможности повышения эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

Объект исследования: бензиновый ДВС с промотирующими добавками водорода.

Предмет исследования: эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

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

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

Научная новизна исследования

Выявлены особенности применение водорода для повышения эффективности процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода.

Практическая значимость работы:

Выявлены возможности повышения эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

На защиту выносятся:

1. оценку наличия особенности применение водорода для повышения эффективности процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода;
2. возможности повышения эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

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 57 наименования. Работа изложена на 73 страницах машинописного текста, иллюстрированного 2 таблицами и 44 рисунками.

ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке наличия особенности применение водорода для повышения эффективности процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода

1.1 Обзор литературы по проблемам с работой двигателя при добавке водорода

Водород показывает отличительные черты приемлемого углеродсодержащего топлива. Сжигание водорода не производит токсичных продуктов, таких как углеводороды, монооксид углерода, оксиды серы, органические кислоты или двуокись углерода. Добавьте дождь, следствием образования SO_2 , и парниковые эффекты CO_2 от этих двигателей устраняются. Хорошо известно, что пролитый водород не оказывает вредного воздействия на ухудшение состояния окружающей среды из-за его высокой плавучести и диффузии в воздухе. Разливы водорода быстро рассеиваются в атмосферу. Пролитый бензин, с другой стороны, часто создает опасность пожара, а в некоторых случаях оказался загрязнителем подземных вод. Из-за серьезности этой проблемы, ЕРА и Конгресс [1], с 20 марта 1992 года, утвердили, что потенциальные источники подземных утечек будут переоценены и заменены, если необходимо. Водород не имеет проблем распыления и испарения жидких топлив, используемых в холодную погоду. Вместо этого он легко смешивается с воздухом, и смесь достаточно стабильна при комнатной температуре; однако, энергия воспламенения водорода низкая по сравнению с другими газообразными и жидким топливом, и она воспламеняется при очень низком эквивалентном соотношении. Пределы воспламеняемости водорода варьируются от 4 до 74 об.% В воздухе при комнатной температуре и давлении. Одним из последствий возвышения является широкий диапазон скоростей пламени и

температур горения, получаемых из водородовоздушных смесей. Водород - самый легкий из элементов с атомным весом 1,0 и наименьшим атомом. Химическое содержание водорода в водороде имеет почти 3 оборота энергии на единицу массы по сравнению с бензином. Однако в жидкой форме бензин имеет 10 видов, столь же плотных, как и водород (плотность жидкого водорода равна 0,07 г/см³). Следовательно, энергия водорода составляет лишь одну треть от объема энергии бензина. Другими словами, почти в 3,5 раза больше водорода приходится на объем за определенное количество энергии, выделяемой во время горения. В качестве топлива для двигателя внутреннего сгорания водород оказался очень взрывоопасным веществом, и необходимо учитывать безопасность. Из-за его низкой энергии воспламенения предварительная зажигания является серьезной проблемой. Небольшое расстояние гашения позволяет пламени проходить через узкие отверстия (впускные и выпускные клапаны будут иметь такие отверстия), а пламя - во впускной коллектор. Детонация двигателя со стехиометрическими или богатыми смесями является еще одним аспектом, который, по-видимому, довольно распространен для двигателей, работающих на чистом водороде. Но эта же характеристика позволяет работать с обогащенным водородом бензиновым двигателем, работающим в сверхтекучем состоянии без детонации, вспышки или пропусков зажигания [2]. Многие экспериментальные и теоретические исследования были проведены с водородом в качестве топлива для двигателей с искровым зажиганием. Двигатели SI работают на всех шести отдельно или в сочетании с бензином. Некоторые из этих видов топлива используются сегодня в сочетании с бензином в качестве переформулированного топлива с использованием этанола или метанола. Они представляют значительный интерес из-за увеличения количества кислорода и водорода, имеющих в распоряжении Али и Базита [3], что важная роль в воспламенении и сжигании - это содержание водорода (отношение H / C) в топливе. Газообразное топливо с

более высоким содержанием водорода горит стабильно, плавно и обеспечивает легкое зажигание.

Поэтому в настоящее время большое внимание стало уделяться наиболее перспективному и реально реализуемому способу получения необходимого количества водорода при помощи электролизеров на борту автомобиля. В данной схеме водород, получается, посредством электролиза воды и подается на впуск в определенных количествах.

Но при этом остаются неопределенными оптимальные количества добавляемого водорода, обеспечивающие требуемые показатели по токсичности и экономичности работы автомобильного двигателя.

Анализ способов подачи водорода в цилиндр двигателя показал, что основные способы можно объединить в следующие группы:

1. Подача водорода на впуске совместно с подачей воздуха в цилиндр двигателя.
2. Индивидуальное дозирование водорода в области впускных клапанов каждого цилиндра двигателя.
3. Подача водорода в цилиндр двигателя под давлением 0.2-4 МПа.
4. Впрыск жидкого водорода во впускной коллектор или цилиндр двигателя.

По первому способу, исследования проводимые [7] показали, что энергия, вводимая с добавляемым водородом 6% от массы топлива, составляет до 11% от общего объема вводимой с топливом энергии. Во время испытаний двигатель запускался на бензине и лишь, потом осуществлялась подача водорода. Это обеспечило безопасную эксплуатацию, и не было никакой возможности, что может произойти утечка водорода в помещение, во время запуска двигателя.

1. Кроме того водорода имеет большое влияние не только на работу двигателя и токсинные выбросы, а также на пределы устойчивой работы при обеднении смеси. Было установлено, что увеличение количества добавляемого водорода повышает крутящий момент двигателя, мощность и

КПД двигателя, на всех составах смеси начиная с $\alpha = 0.91$ и выше до предела эффективного обеднения смеси. При этом влияние водорода с обеднением смеси увеличивается.

2. При работе двигателя с 6% водорода обеспечивается предел эффективного обеднения смеси 1.3, где достигается повышения крутящего момента, мощности и улучшить удельного расхода топлива примерно на 35%. Кроме того, двигатель работает плавно и контролируемо.

3. Использование водорода повышает границу обеднения смеси до $\alpha = 1.47$, в тоже время для бензина она составляет $\alpha = 1.24$.

4. Обеднение смеси, обеспечиваемое до границы устойчивого сгорания добавкой водорода, позволяет снизить концентрацию CO и CH в ОГ.

5. В целях сокращения выбросов CH + NOx до 5 г/л.с.-ч, или менее, при 6% добавке водорода, необходимо работать на коэффициент избытка больше, чем 1,34.

6. Кроме того, очевидно, что двигатель, работающий на составах смеси $\alpha = 1.35$, обеспечивает снижение выбросов токсичных компонентов ОГ значительно ниже, чем нормы по токсичности ЕВРО-4, и позволяют выполнять ЕВРО-6.

Было показано, что нежелательные явления сгорания, такие как обратные вспышки и калильное зажигание можно избежать с помощью отдельного впрыска топлив. Кроме того, результаты показывают, что время задержки для впрыска бензина при работе с водородом не является необходимым, и впрыск может быть начат в ВМТ. Проведенные исследования показали, что для значительного сокращения выбросов токсичных компонентов с ОГ необходимо осуществить устойчивую и эффективную работу на составах смеси 1.3-1.35. Сопоставления всех результатов показывает, что топливо в сочетании бензина и водорода обеспечивает требуемые условия протекания сгорания, лучшую производительность, и расширение пределов стабильного сгорания.

Проводимые исследования показали, что добавление небольшого количества водорода повышает тепловой КПД двигателя и снижает токсичные выбросы ОГ при работе на бедной смеси, устойчивая работа при обеднении смеси с добавкой водорода обеспечивается за счет сохранения высокой скорости распространения пламени соответствующей сгоранию на стехиометрических смесях. Это значительно расширяет пределы устойчивого обеднения смеси, так экспериментально было показано, добавка 6% от массы топлива водорода позволяет осуществлять стабильную и устойчивую работу двигателя на коэффициенте избытка воздуха 1,35. Кроме того, показано, что для получения повышения эффективности процесса сгорания на 20-25% необходимо небольшое количество водорода, которое обеспечивается за счет небольшой системы хранения водорода и компактного бортового источника водорода, одним из вариантов является бортовой электролизер, питаемый от генератора. Данная система не потребует значительного увеличения веса и объема необходимого для хранения топлива.

Основные выводы этого исследования являются привлекательными для дальнейшей реализации в серийно выпускаемых транспортных средствах. Во-первых, например, применение двух топливной системы питания (бензин + водород) могут использоваться круиз-контролером при движении на установившемся скоростном режиме на бедной смеси. Затем, при разгоне, система может быть включена для облегчения работы двигателя в условиях повышенных нагрузок. Второй пример, может быть, приложение к гибридной автомобильной системе. В этом случае, двигатель используется для зарядки батареи, и может работать двухтопливном экономичном режиме. Это позволило бы значительно снизить потребление топлива на 15-20%, а также обеспечить снижение уровня выбросов токсичных компонентов ОГ.

Элемам и Десоки [4] изучили свойства горения водородно-воздушной смеси и обнаружили, что она имеет более высокую температуру самовозгорания, чем смесь бензина и воздуха, что повышает ее устойчивость к ударам. Кроме того, они сообщили, что единственными токсичными

продуктами сгорания водорода являются оксиды азота. Shudo и др. [5] обнаружили, что потери тепла на стенке камеры сгорания из-за использования карбюрированного водорода выше, чем у бензина. Чтобы уменьшить потери тепла, необходимо было замедлить время зажигания и увеличить коэффициент избыточного воздуха.

Таким образом, на основании проведенного теоретического обзора, можно сделать вывод об отсутствии единой теории воспламенения, сгорания и детонационной стойкости в бензиновых двигателях, работающих с добавками водорода.

1.2 Методы подачи водорода в ДВС

Методы индукции топлива [4, 6] ранее были разделены на четыре категории. К ним относятся: непрерывное карбюрирование, непрерывное впрыскивание коллектора, впрыск с временным коллектором и впрыск прямого цилиндра низкого давления. Водород, подаваемый либо карбюрированием, либо непрерывным впрыском коллектора, часто вызывает нежелательные явления сжигания. В некоторых рабочих условиях с водородным заправкой с помощью обоих методов произошли обрывы и быстрые темпы повышения давления. Источником энергии воспламенения, ответственным за вызвавший обратный поток, может быть либо свеча зажигания, выпускной клапан, либо некоторые отложения, действующие как горячие точки в камере сгорания. Белогуб и Талда [7] разработали несколько видов водородно-бензиновых карбюраторов, которые улучшили топливные смеси. Сохраняются проблемы относительно доли бензина, водорода и воздуха в топливно-воздушных смесях для ряда условий работы двигателя.

Lee, et al., [8] предполагают, что обратный огонь может быть устранен впрыском впускного отверстия, но он по-прежнему происходит с коэффициентом эквивалентности топлива и воздуха вблизи стехиометрического или по мере ускорения искрового времени. Das, et al.,

[6] дополнительно изучили управляемую электронным управлением соленоидную систему впрыска, которая позволила двигателю работать бесперебойно без каких-либо проблем с обратным огнем, стуком или быстрым повышением давления. Единственное беспокойство - уровень выбросов NO_x , когда $1/\alpha$ выше 0,5. Аль-Гами [9] сообщил, что инжектор, который должен работать в условиях высокой температуры и высокого давления, создает технические трудности и приводит к более сложному компоненту инжектора. Номан и Мсlean [10] провели обширное исследование по двигателю ASTM-CFR с использованием прямой подачи водорода в цилиндр для стандартной головки цилиндров при цикле Otto и Diesel. Инжекция газообразного водорода начинается в последней части такта сжатия. Уровень эмиссии NO_x уменьшается, когда отношение эквивалентности меньше человека 0,5. Тем не менее, уровень выбросов NO_x , полученный с использованием водорода, выше, чем работа бензина, для коэффициентов $1/\alpha$ больше 0,3. Поскольку коэффициент $1/\alpha$ уменьшается от 0,8 до 0,3, указанный тепловой КПД увеличивается с 31% до 43%, но указанное среднее эффективное давление уменьшается от 0,78 до 0,3 МПа. Green and Glasson [11] разработали инжектор под высоким давлением с электронным управлением для подачи водорода без утечки во время позднего сжатия, используя электрометрическое седло клапана. С этим инжектором были устранены нежелательные проблемы с горением. Кроме того, метод впрыска под высоким давлением улучшал объемную эффективность. Пиковая выходная мощность этого водородного двигателя увеличилась на 20% по сравнению с бензиновым двигателем. Поскольку водородный двигатель работал ниже $\phi = 0,8$, выброс NO_x был очень низким. Они также предположили, что расположение инжектора должно быть близко к свече зажигания, что позволит впрыскивать позже в такте сжатия. Таким образом, своевременное внедрение впрыскивания представляется наиболее подходящим и эффективным способом подачи топлива. Как воздух, так и топливо поступают в камеру сгорания во время такта впуска, хотя топливо

впрыскивается только тогда, когда впускной клапан открыт и полностью вытягивается в цилиндр перед закрытием впускного клапана. В целях реализации этой технологии впрыска топлива необходима электронная управляемая система впрыска, и это было разработано Уильямсоном М., [13]. Эксперименты с использованием этого метода были сообщены автором [14]. Он принимает входной сигнал от схемы оптического датчика, обрабатывает его и посылает сигнал в виде импульсов в соленоид, чтобы приводить в действие подъем плунжера в течение требуемой продолжительности. Этот блок управления обеспечивает подачу топлива после открытия впускного клапана, но подача топлива прекращается до завершения периода закрытия впускного клапана и, следовательно, внутренне исключает возможность нежелательных явлений сжигания, таких как предварительное зажигание. Скорость потока топлива контролируется длительностью процесса впрыска и давлением подачи. Эта электронная система была испытана с использованием смесей этанола, метанола и пропана в исследованиях [12, 13].

1.2 Эффективность работы двигателя при добавке водорода

Ивон и Лоренцони [14] провели экспериментальное исследование с малым двигателем внутреннего сгорания с водородом. Носителем для водорода является гидрид металла. Водяные пары и небольшое количество NOx были в основном обнаружены в выхлопных продуктах. Однако выходная мощность была на 20% меньше, чем у бензина при той же частоте вращения двигателя.

Петерс и Квадер, [15] исследовали влияние изменения времени впрыска бензина на разные точки цикла двигателя с постоянной скоростью и в суровых условиях. Предельный предел пропуска зажигания произошел при $\phi = 0,55$, когда впрыск топлива был приурочен к открытому положению впускного клапана, при $\phi = 0,67$ с предварительно смешанным зарядом и при

$\phi = 0,78$, когда впрыск топлива произошел, когда впускной клапан был закрыт. (Похоже, что на предельный показатель пропускания зажигания повлиял период времени, в течение которого топливо-воздух тщательно перемешивалось.)

Леви и Киттельсон [16] изучили водородный двигатель с временным впрыском с использованием электронного устройства управления. В этом случае быстрая эксплуатация обеспечила хорошую экономию топлива и сокращение выбросов NO_x .

Матур и Дас [17] провели обширное исследование водородного двигателя с использованием системы впрыска с временным коллектором. В их отчетах о работе двигатель может работать с низким значением $\phi = 0,218$. Эта система впрыска также позволила двигателю работать в широком диапазоне нагрузок и скоростей, не вызывая каких-либо нежелательных явлений сжигания. Однако произошла значительная потеря мощности.

Дас и др. [11] провели экспериментальную работу на одноцилиндровом двигателе с использованием инжектирования с временным коллектором для подачи либо водорода, либо сжатого природного газа. Время впрыска водорода устанавливали на 20° ATDC, а СПГ устанавливали в ВМТ. Результаты показывают, что подача водорода уменьшает удельный расход топлива и улучшает тепловой КПД тормоза, доводя его до 31%, в то время как работа СПГ он равен 28%.

1.4 Токсичность работы двигателя при добавке водорода

Дас, [11] изучил водородный двигатель и показал, что в результате операции были получены чрезвычайно низкие углеводороды и выбросы монооксида углерода; Тем не менее, NO_x был значительно выше в зависимости от условий максимальной мощности и эффективности. Коэффициент эквивалентности $1/\alpha$ был контрольным параметром для уровня NO_x . Чтобы устранить любую проблему загрязнения окружающей среды,

особенно уровень NO_x , двигатель должен работать с коэффициентом эквивалентности $\phi = 0,6$. Он также предполагает, что работа гибридного водородного двигателя с бензином может существенно снизить выбросы всех регулируемых загрязнителей.

Verhelst и Sierens [12] модифицировали двигатель, оснащенный последовательной системой многоточечного впрыска. Сообщалось, что эта топливная система имеет преимущество для управления подаваемым топливом. Тем не менее, работа в режиме холостого хода на полном дросселе в условиях обедненной смеси имеет до 3 об.% несгоревшего водорода в выхлопных газах.

Шиомото и Соьер [14] в своем экспериментальном исследовании использовали пьезоэлектрический преобразователь давления для измерения давления в цилиндре и определения изменения давления по циклу при сжигании в ДВС с искровым зажиганием в условиях обедненной смеси с природным газом в качестве топлива. Коэффициент эквивалентности варьировался от $\phi = 1,1$ до наименьшей операции, $\phi = 0,3 \sim 0,6$. Все чаще происходит нестабильная работа, когда рабочее состояние двигателя опускается ниже $\phi = 0,6$. Значительное увеличение концентраций HC около $\phi = 0,6$ связано с неполным сгоранием, а CO оставалось неизменным. В условиях обеднения температура горения низкая, что снижает уровень NO_x .

1.5 Двухтопливный режим работы двигателя при добавке водорода

Гоу и др. [15] провели экспериментальные работы на одноцилиндровом двигателе с использованием смеси природного газа и бензина. Эксперименты начались с одного топлива, и по мере добавления второго топлива первое топливо было уменьшено на такое же количество энергии. Смесь 90% бензина и 10% природного газа обеспечивает как максимальную мощность, так и эффективность.

Карим и др. [16] сообщили о значительном улучшении характеристик двигателя за счет подачи метана-водорода, Le. Hythane, к одноцилиндровому двигателю с более компактными смесями. Шреста и Карим [17] провели некоторые дальнейшие исследования по улучшению характеристик двигателя СИ за счет подачи относительно небольших количеств водорода с метаном. В этой работе было показано, что оптимальная концентрация водорода составляет около 20-25 об.%, Чтобы значительно улучшить выходную мощность двигателя и избежать детонации. Это связано с тем, что метан имеет низкую скорость пламени в сухом состоянии, а присутствие водорода увеличивает общую скорость горения смесей. Поскольку отношение эквивалентности увеличивается в сторону стехиометрического состояния, добавление водорода к метану не повышает мощностные показатели, поскольку скорость горения обоих видов топлива значительно возрастает.

Ноеhn и др. [8] провели некоторые экспериментальные исследования на полноразмерном пассажирском транспортном средстве с использованием обогащенного водородом бензина, работающего в условиях сверхтекучего состояния. Их экспериментальное исследование обеспечивало доставку водорода либо из сжатого газообразного водорода, либо из бортового генератора водорода. Они сообщили о сокращении общего потребления энергии на 25% по сравнению с базовым показателем эксплуатации бензина. Двигатель, работающий с небольшим количеством водорода в условиях ультра-обеднения, уменьшил выброс NO_x и улучшил общую эффективность.

Парки [9] провели обширное исследование на одноцилиндровом двигателе, использующем различные пропорции водородной и бензиновой смеси при постоянной степени сжатия, скорости, воздушном потоке и при установке искрового зажигания, который создает максимальный тормозной момент. Его работа показывает, что при одинаковом коэффициенте эквивалентности по недостатку воздуха $1/\alpha$ выбросы NO_x увеличиваются с увеличением содержания водорода. Тем не менее, обогащенный водородом

двигатель позволяет двигателю работать на обедненной топливно-воздушной смеси, что снижает выбросы NO_x . Здесь выбросы CO могут быть незначительными для этих сухих смесей. Но плохое сгорание начинается ниже $\phi = 0,8$, что приводит к увеличению выбросов HC . По мере увеличения количества добавок водорода HC медленно увеличивается с более низкими значениям.

Макдональд [10] провел экспериментальное исследование на многоцилиндровом карбюрированном бензиновом двигателе с использованием добавки водорода. Цели состояли в том, чтобы достичь очень высокого обеднения и низких уровней NO_x . Базовая линия бензина была выполнена в диапазоне от $\phi = 1,08$ до $\phi = 0,64$. Для каждого потока топлива с фиксированным добавлением бензин снижался до появления пропусков зажигания, чтобы помочь найти оптимальную точку эффективности двигателя. Сокращение эксплуатационного предела двигателя продлевается за счет добавки водорода, и это рабочее состояние показывает улучшение эффективного КПД, крутящего момента, снижение NO_x и CO , но без изменения уровней выбросов HC .

Лукас и Ричардс [11] провели некоторые экспериментальные исследования на двигателе с искровым зажиганием, добавляя небольшое количество водорода к бензину. Двигатель работал на полном дросселе, во всем диапазоне нагрузок с постоянным количеством водорода и работе только на водороде при режиме холостого хода. По мере увеличения нагрузки количество бензина было увеличено. Широко открытая дроссельная заслонка уменьшает насосные потери. В условиях экономичного режима работы выбросы CO и NO_x были снижены, но HC , как правило, увеличивался.

Sfinteanu и Apostolescu [12] сообщили, что работа двигателя для легковых автомобилей, использующих только бензин, имеет ограниченный предел около $\phi = 0,83$, в то время как водородно-бензиновый двигатель будет продолжать работать в условиях очень обедненной смеси. Комбинация

водорода и бензина обеспечивала сокращение выбросов CO на 25% и примерно одинаковые концентрации NO_x.

Сообщалось Jingding и соисследователями [13], что предел воспламеняемости карбюрированной бензино-воздушной смеси может быть расширен за счет обогащения небольшим количеством водорода. Это позволяет увеличить скорость распространения пламени и ускорить скорость горения смеси. В этом случае они утверждают, что выбросы CO на 20% ниже по сравнению с эксплуатацией без водородной добавки при одной и той же нагрузке. Улучшаются термическая эффективность и, следовательно, экономия топлива, системы, а также уменьшается уровень загрязняющих веществ.

Аль-Багдади [17] сообщает, что эксплуатация бензинового двигателя с двойным добавлением водорода и этилового спирта улучшает характеристики двигателя и снижает выброс NO_x. Таким образом, очевидно, что водород был предметом многочисленных исследований в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. Хотя его широкие пределы воспламеняемости обеспечивают важные преимущества, его легкая воспламеняемость внешними источниками и быстрый темп горения приводят к многочисленным эксплуатационным проблемам.

1.6 Получение водорода при электролизе воды

Электролизеры воды используются в крупной промышленности. С их помощью достигается разложение воды электролитическим методом на водород и кислород.

Благодаря их действию становится возможным охлаждением генераторов на атомных и тепловых электростанциях, гидрогенизация жиров и образование защитной атмосферы в процессе производства твердых сплавов, микропроцессоров, стекла, электроламп и чистых газов.

Водород всегда был необходим на производственных промышленных цехах. За всю историю их существования было испытано множество различных способов его получения. Однако большинство их не прижились. И в первую очередь из-за очень дорого технологического процесса получения водорода. Электролизеры воды позволили сократить затраты на производства водорода к минимуму, а саму технологию процесса сделать достаточно легкой.[27]

Производство водорода с помощью электролизеров воды очень выгодно. Оно имеет ряд преимуществ, которые невозможно получить в других технологиях производства водорода.[46]

В первую очередь это чистота получаемого водорода. Поскольку разложение воды на кислород и водород происходит внутри корпуса электролизера с помощью электролитического метода, отсутствуют всякие химические добавки, которые могли бы благоприятствовать разложению, чистота выходной продукции идеальна (рисунок 1.1).

Дешевизна сырья для производства водорода. Это одно из основных достоинств электролизеров. Вода действительно имеет очень низкую

себестоимость. Гораздо более низкую, чем любое другое природное вещество, содержащее в своем составе водород.

Электролизеры воды обеспечивают экологически чистое производство водорода. Это достигается за счет того, что для разложения воды используется только электричество. Также процесс разложения не имеет никаких



Рисунок 1.1 – Электролизер для получения водорода из воды, методом электрохимического разложения.

вредных жидкостных или воздушных отходов.

Электролизеры воды очень просты в эксплуатации. Даже человек без соответствующего опыта работы поймет, как с ними надо обращаться. А прилагаемая к устройству инструкция, полностью введет в курс дела.

Электролизеры воды также имеют достаточно длительный срок эксплуатации. При соблюдении условий использования оборудования, срок его службы без ремонта сможет достичь минимум десяти лет, а то и больше.

На сегодняшний день электролизеры применяются в химической, газоперерабатывающей, атомной, пищевой, радиотехнической и нефтехимической отраслях

Как известно, электролизом называется процесс разложения вещества при пропускании через него электрического тока. Так, если в воду погрузить два электрода и приложить к ним электрическое напряжение, то на катоде (–) будет выделяться водород, а на аноде (+) будет выделяться кислород. На катоде будет осуществляться следующая реакция:



Таким образом, при реакции (1) два электрона, поступающих с катода, реагируют на поверхности электрода с двумя молекулами воды, образуя молекулы водорода и два иона гидроксила. При этом молекулярный водород образует пузырьки газообразного водорода, а ионы гидроксила остаются в растворе.

На аноде будет осуществляться реакция



Таким образом, при реакции (2) четыре электрона переходят на анод с двух молекул воды, которая при этом разлагается с образованием молекулы кислорода и четырех ионов водорода.

Следует отметить, что, поскольку в чистой воде концентрация ионов H^+ и OH^- мала, то ток между электродами также очень мал и электролиз чистой воды идет очень медленно. Вследствие этого для разложения воды используются электролиты – растворы щелочей, кислот и солей.

В широко используемых в промышленности традиционных электролизерах с жидким электролитом: ФВ, СЭУ (Россия), Weuder Model, De Nora (Италия), Norsk (Норвегия), Stuart Imet (Бельгия), Teledyne (США), Loncza, Demag (ФРГ) - электролиз воды осуществляется в диапазоне температур от 333 К до 353 К и плотности тока от 1200 А/м² до 2500 А/м². В промышленных электролизерах энергозатраты (в зависимости от температуры процесса, давления, качества электродов, конструкции электролизера и ряда других факторов) изменяются в пределах от 4,3 кВт-ч/м³ до 5,2 кВт-ч/м³ H₂. [29]

Перспективным направлением развития водородной энергетики следует считать создание новой технологии электрохимической генерации водорода и кислорода, основанной на применении электрокаталитической конверсии с использованием в качестве электродных материалов металлов с переменной валентностью. Анализ данных электролизеров показал, что затраты электроэнергии на генерацию 1 м³ H₂ (и 0,5 м³ O₂) в пределах от 4,1 кВт-ч до 3,8 кВт-ч.

Также существуют портативные генераторы водорода.

1.7 Небольшой патентный обзор существующих запатентованных решений по применению добавок водорода в автомобильных двигателях

Автомобиль, потребляющий смесь бензина с водородом, представила техасская компания Ronn Motors. Водород будет вырабатываться прямо на борту авто: небольшое количество водорода специальный электролизер генерирует из воды, затем топливо подается в ДВС вместе с бензином,

поясняют в компании. Доля водорода на некоторых режимах может достигать до 30-50%.

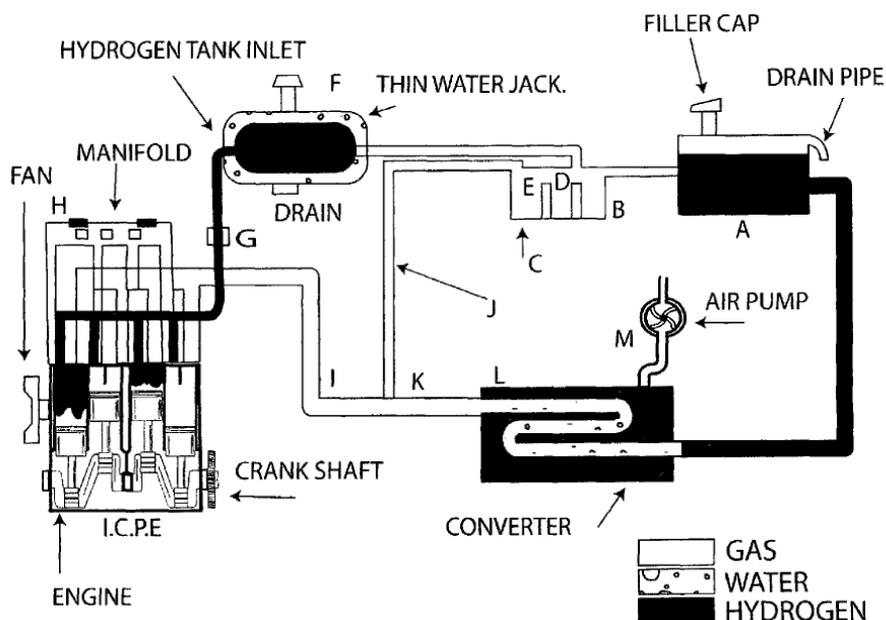


Рисунок 1.2 – Автомобиль, работающий на смеси бензина с водородом

Изобретатель Christian Osita запатентовал систему питания двигателя водородным топливом (Рисунок 1.2). Путем электролиза воды получается водород, который после сгорания в ДВС образует молекулы воды. Эта вода улавливается и направляется повторно в электролизер, таким образом снижается потребность в заправке водой электролизера.

Компания Ford Global Technologies, LLC запатентовала систему питания двигателя водородным топливом (рисунок 1.3). Двигатель с искровым зажиганием содержит ловушки обедненного NOx, система рециркуляции отработавших газов периодически очищает эти ловушки, так что двигатель работает на обогащенном составе смеси, а масса отработавших газов составляет 40-80% от массы топлива и воздуха.

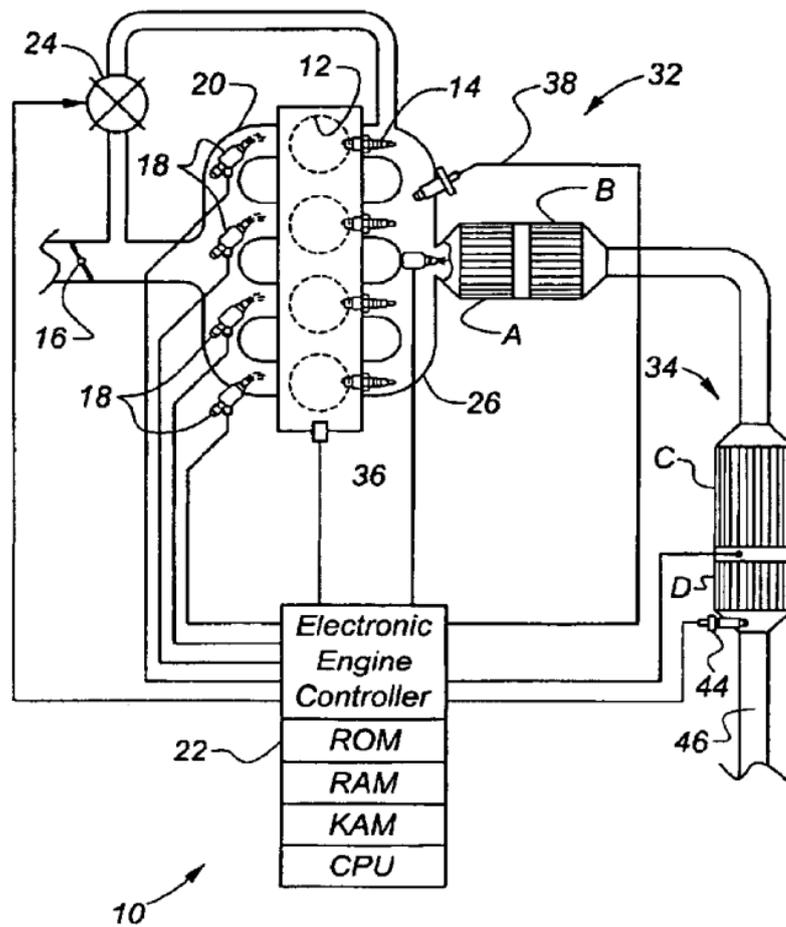


Рисунок 1.3 – Система питания двигателя водородным топливом

На рисунках ниже приведены основные технические решения по исследуемой области.

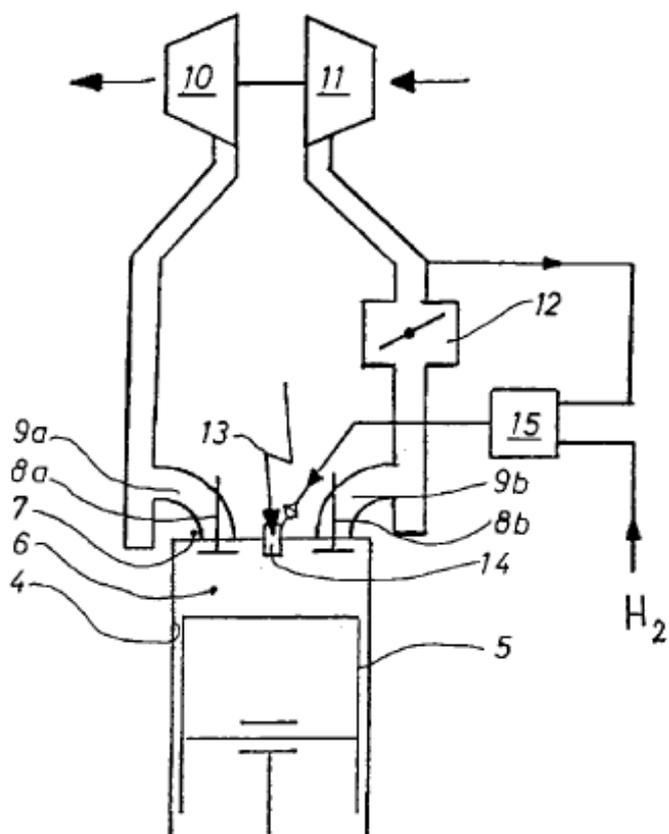


Рисунок 1.4 – Компания Deutz запатентовала газовый двигатель с предкамерой сгорания, в качестве топлива может использоваться водород

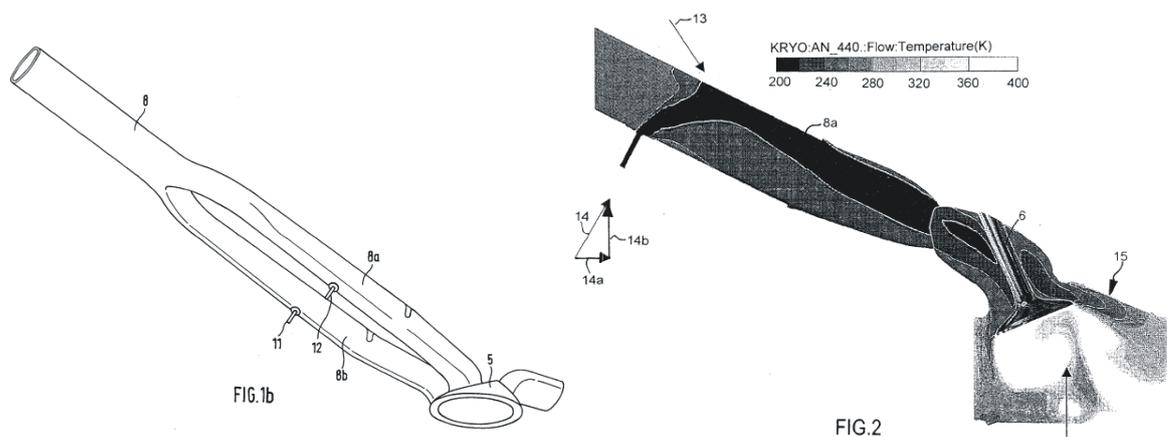


Рисунок 1.5 – Компания BMW запатентовала систему подачи топливной смеси в цилиндр ДВС подачей жидкого водорода во впускной канал

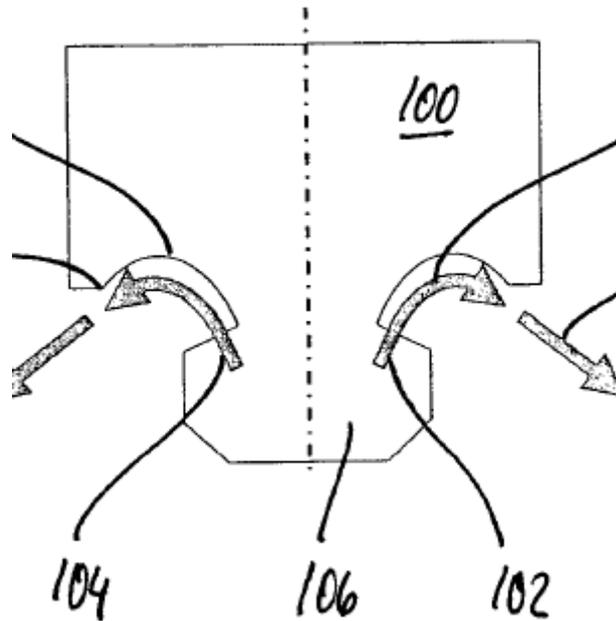


Рисунок 1.6 – Компания BMW запатентовала форму камеры сгорания между поршнем и верхней крышкой камеры сгорания для ДВС, работающего на водородном топливе. Два вихря водород-воздух при наполнении цилиндра взаимодействуют с отражателями

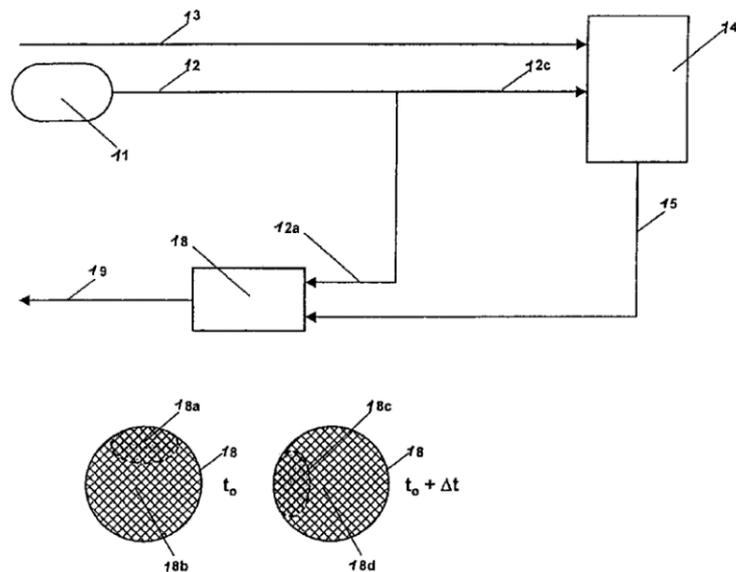


Рисунок 1.7 – Компания BMW патентует способ снижения токсичных компонентов NOx путем добавки водорода в поток отработавших газов ДВС

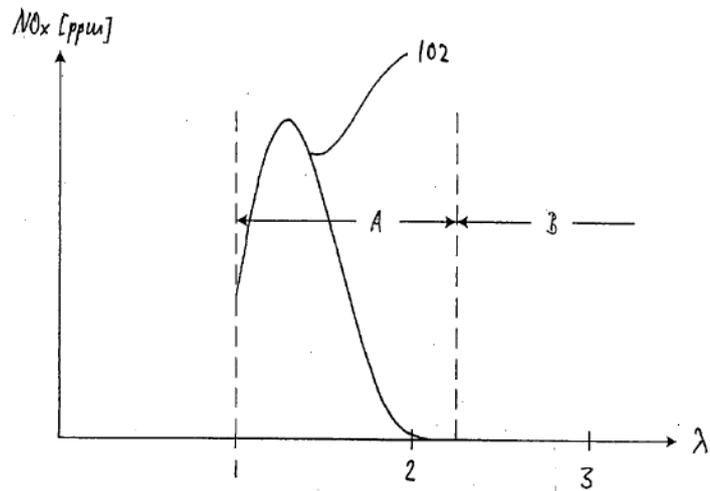


Рисунок 1.8 – Компания BMW запатентовала ДВС, работающий на водородном топливе в области бедных смесей для снижения выбросов NOx

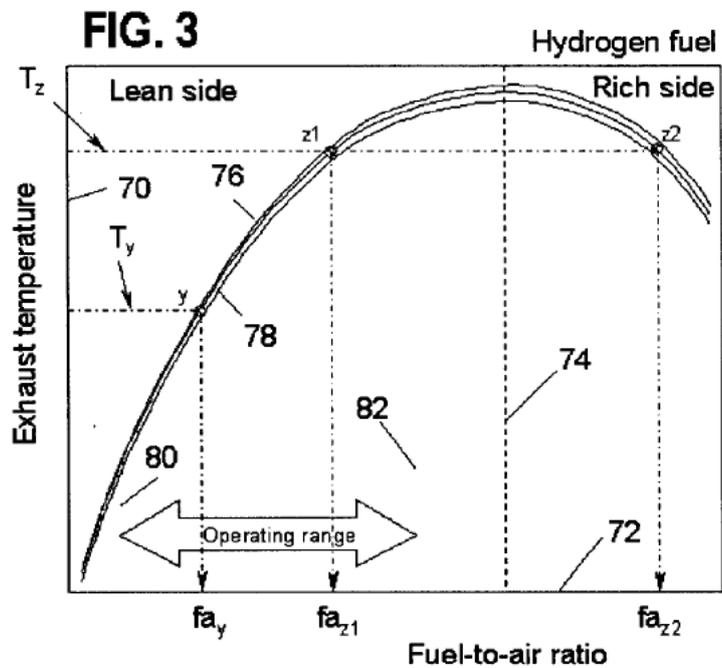


Рисунок 1.9 – Компания Ford запатентовала ДВС на водородном топливе, работающий в области стехиометрического состава и в области бедных смесей

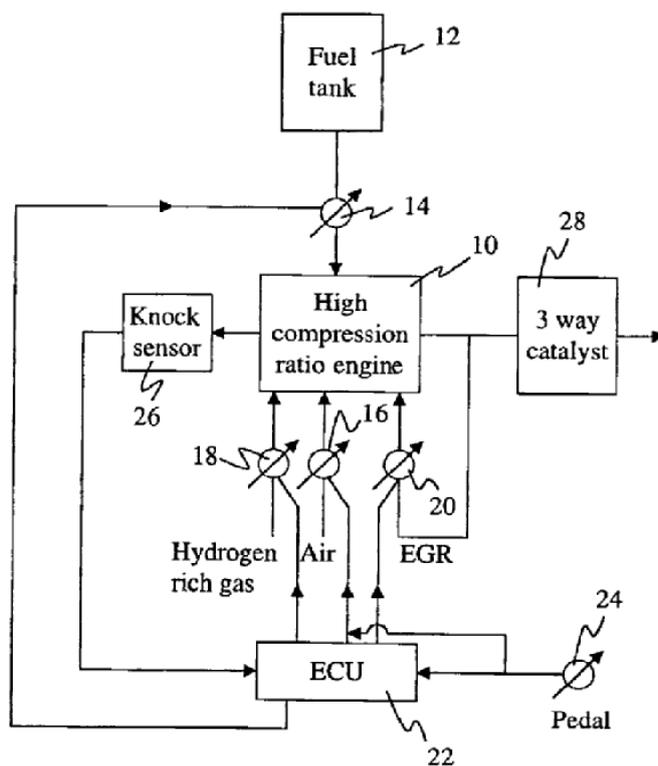


Рисунок 1.10 – Массачусетский университет (США) запатентовал ДВС с добавкой водорода для организации управляемого воспламенения от

сжатия

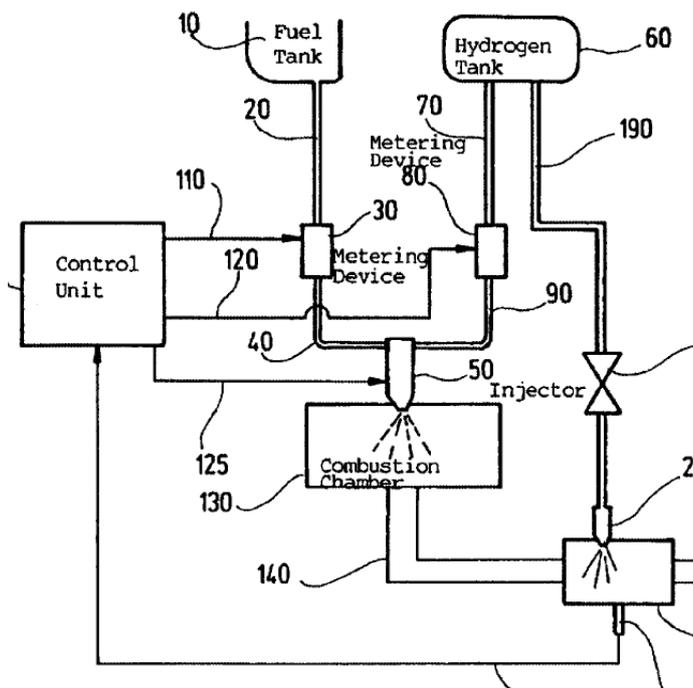


Рисунок 1.11 – Компания Bosch запатентовала многотопливный ДВС с водородным баком и систему управления работой такого двигателя

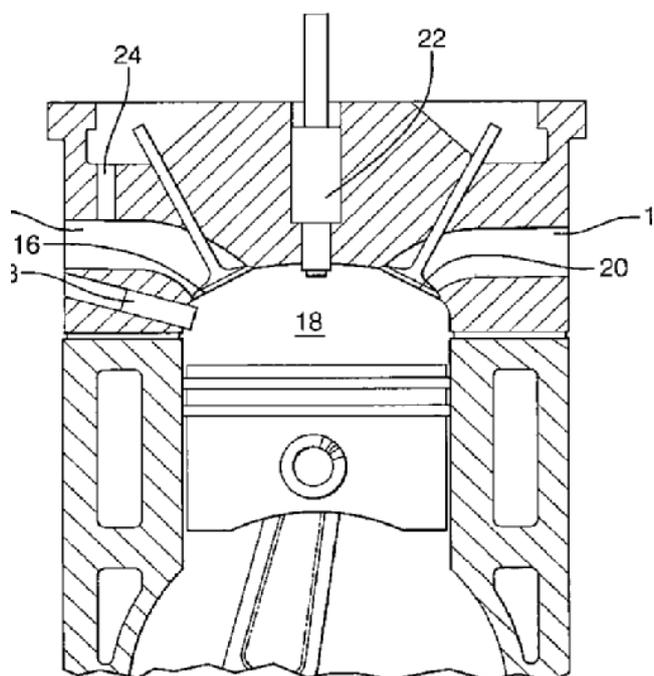


Рисунок 1.12 – Компания Delphi запатентовала рабочий процесс ДВС с воспламенением от сжатия с обогащением заряда добавкой водорода

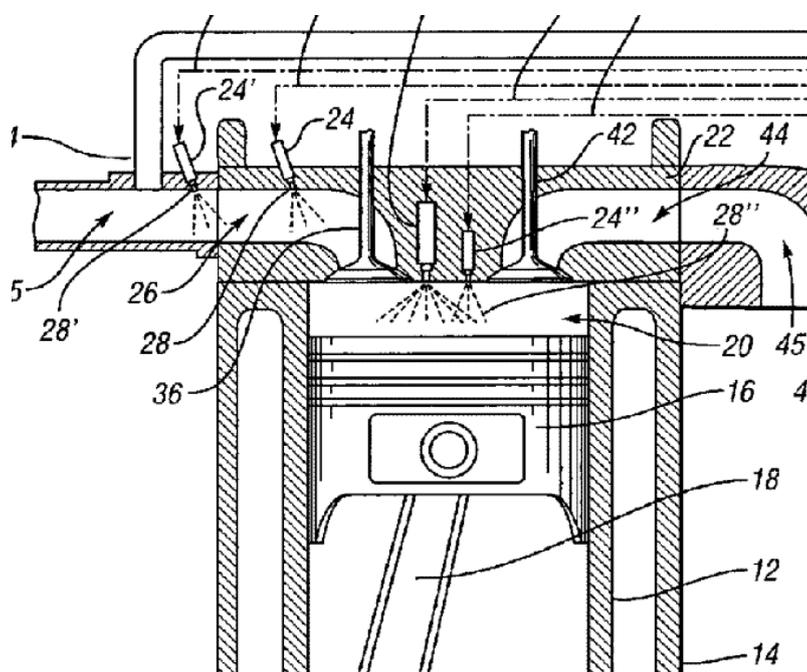


Рисунок 1.13 – Компания General Motors запатентовала двухтопливный ДВС, способный работать с добавкой водорода

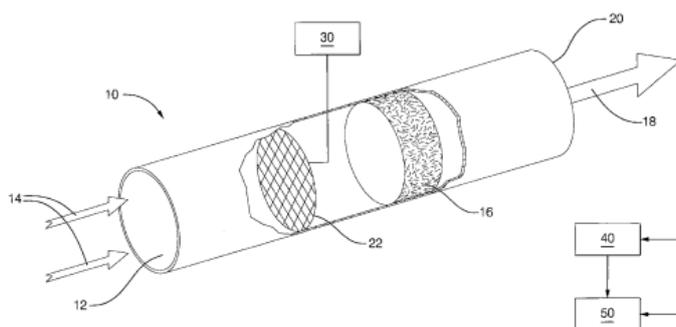


Рисунок 1.14 – Компания Delphi запатентовала реформер «быстрого запуска» (Рис. А14). Реформер позволяет получать водородосодержащий газ из углеводородного топлива.

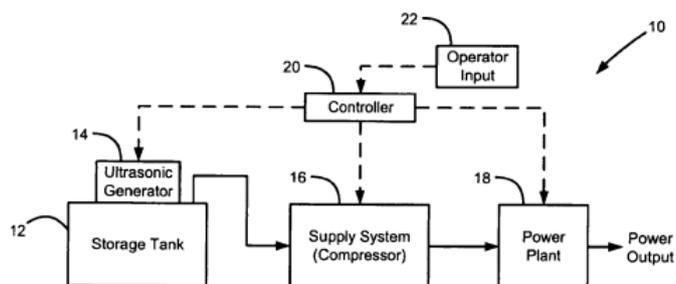


Рисунок 1.15 – Компания General Motors запатентовала систему SONO каталитического и ультразвукового получения водорода на борту автомобиля.

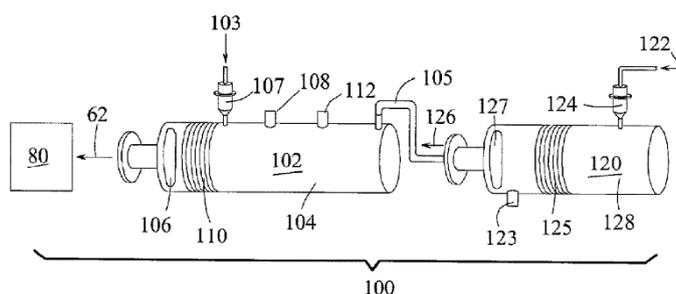


Рисунок 1.16 – Компания Delphi запатентовала систему быстрого старта основного блока реформера для получения водорода из топлива

Заключение по патентному анализу

Проведенный поиск показывает отчетливые тенденции по отработке конструкции электролизеров, а также компонентов систем управления для

практического применения водорода, не только как добавки к бензиновому топливу, в традиционных поршневых ДВС автомобилей, но и как основного топлива для них. Это следует рассматривать как глобальную тенденцию плавного перехода к полностью водородной силовой установке через использование этих компонентов для применения водорода на транспорте сначала в качестве добавок к основному топливу, а затем как основного топлива или одного из видов топлива в двух- и многотопливных ДВС. Также прослеживается повышение наукоемкости при выполнении и последующем патентовании исследований – разработки в области компонентов водородной топливной энергетики на транспорте ведутся и периодически патентуются небольшим количеством корпораций и университетских центров, применяются сложные технологические процессы и компьютерное моделирование для улучшения показателей продукции, которые относятся к высоким технологиям.

ГЛАВА 2 Описание экспериментального оборудования

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). Основная информация о геометрических параметрах двигателя УИТ-85 приведена в таблице 2.1. А основная информация о геометрических параметрах двигателя ВАЗ-2111 приведены в таблице 2.2.

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.

Для выполнения поставленных целей и задач исследования выполнена подготовка стендов и необходимого исследовательского оборудования для проведения экспериментов по выявлению связи электропроводности в

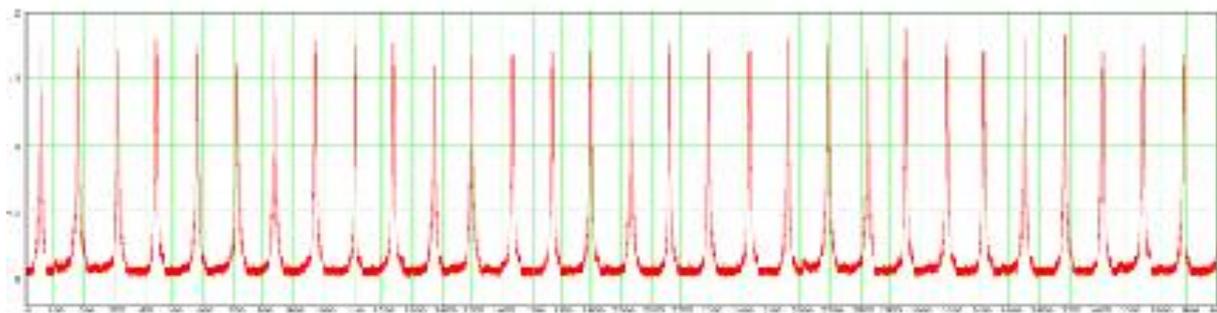
пламени с химической активностью смеси и определения характеристики тепловыделения на режимах глубокого дросселирования при высокой забалластированности рабочего тела. В результате выполнено:

- доработаны конструкции ионизационных датчиков для проведения более точных экспериментов в одноцилиндровой установке УИТ-85 (рисунок 2.1);
- разработаны конструкции ионизационных датчиков для установки их в специальную исследовательскую пластину, что снизило степень сжатия до 7,5 двигателя ВАЗ-2111 (рисунок 2.2);
- разработаны конструкции ионизационных датчиков для установки их в головку блока цилиндра двигателя ВАЗ-11183, без нарушения целостности рубашки охлаждения (рисунок 2.3);
- проведена сборка следующих исследовательских стендов для проведения экспериментальных работ по теме проекта: в одноцилиндровой установке УИТ-85, произведена установка на впуск дроссельного элемента, позволяющего имитировать режимы работы двигателя на глубоком дросселировании, и блока газовых форсунок для подачи природного газа и водорода; в двигателе ВАЗ-11183 установлены датчики ионизации по два в каждый цилиндр, а на выпуске на каждый цилиндр установлены широкополосные лямбда-зонды и термопары; в двигателе ВАЗ-2111 установлена специальная исследовательская пластина с датчиками ионизации.

Выполнена тарировка и проверка работоспособности стендов и исследовательского оборудования, проведена оценка погрешности измерения и поверка измерительного оборудования. Проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния состава рабочего тела газового топлива на характеристики тепловыделения на режимах глубокого дросселирования в УИТ-85 и в двигателях ВАЗ-11183, ВАЗ-2111. Примеры получаемых индикаторных диаграмм приведены на рисунках 2.1б, 2.2б, 2.2в, 2.3б, 2.3в.



а)



б)



в)



г)

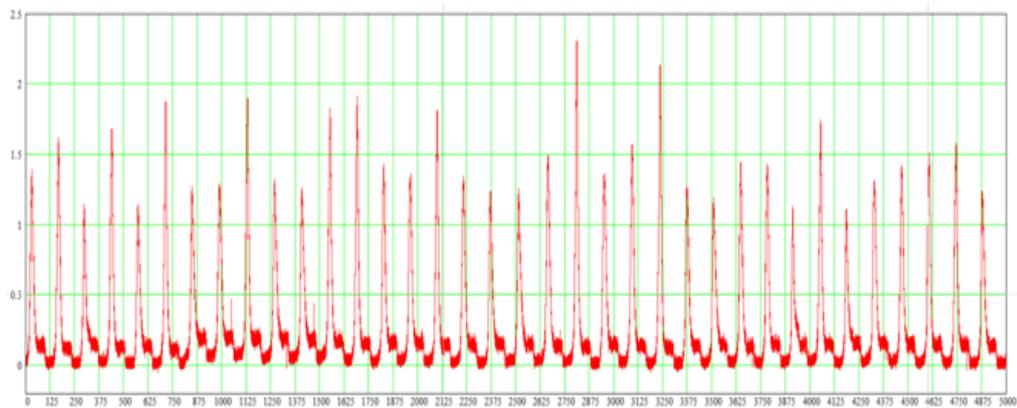


д)

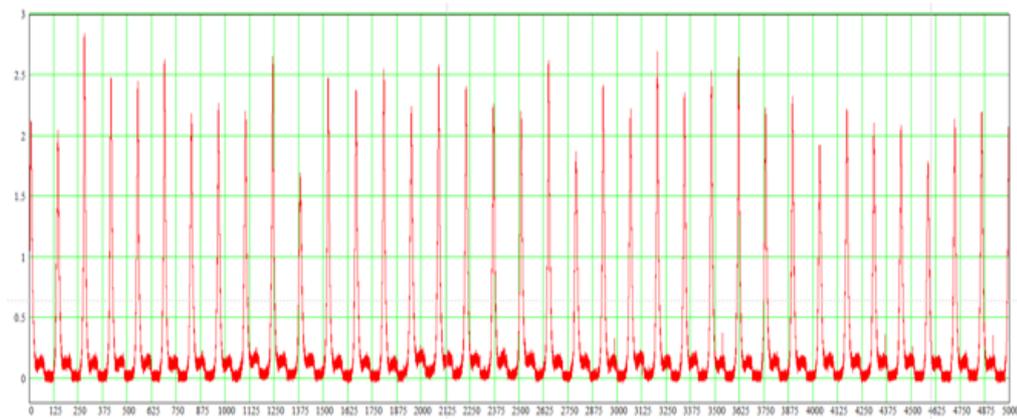
Рисунок 2.1 – Экспериментальное оборудование: (а) одноцилиндровая установка УИТ-85; (б) осциллограмма давления; применяемые ионизационные зонды: (в) 3-х электродный с углубленным центральным электродом; (г) 2-х электродный с датчиком давления, (д) электрод рядом со свечей зажигания



а)



б)

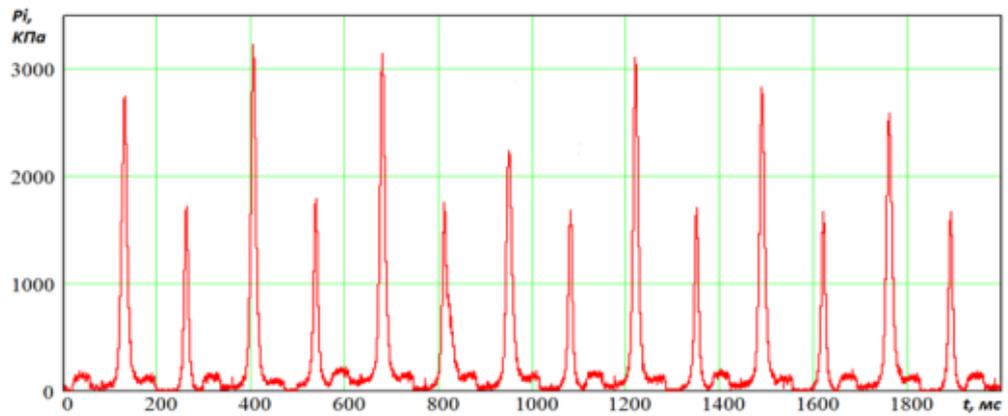


в)

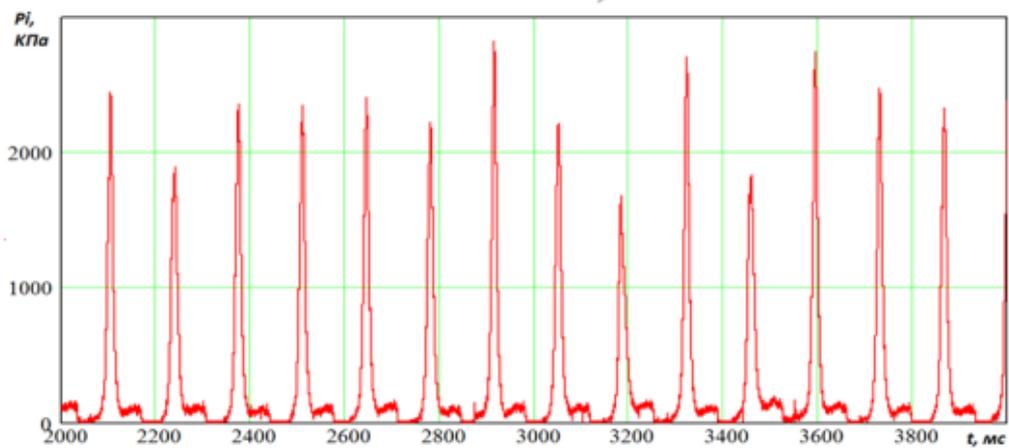
Рисунок 2.2 – Экспериментальное оборудование: (а) двигатель ВАЗ-2111 с распределенным впрыском топлива и исследовательская пластина с датчиками ионизации; осциллограммы давления: (б) для бензина и (в) для бензина с 6% H_2



а)



б)



в)

Рисунок 2.3 – Экспериментальное оборудование: (а) двигатель ВАЗ-11183 с распределенным впрыском топлива и ГБЦ с датчиками ионизации в каждом цилиндре; осциллограммы давления: (б) для бензина и (в) для бензина с 6%

H_2

Таблица 2.1 - Основная информация о геометрических параметрах экспериментальной установки (двигателя) УИТ-85

Тип	УИТ-85
Число цилиндров	1
Рабочий объем, л	0,652
Степень сжатия	4 – 10
Диаметр цилиндра, мм	85
Ход поршня, мм	115
Длина шатуна, мм	266
Частота вращения, мин-1	600 или 900
Подача топлива	Бензин – карбюратор Природный газ – форсункой во впускной коллектор
Зажигание	Свеча зажигания

Таблица 2.2 - Основная информация о геометрических параметрах экспериментальной установки (двигателя) ВАЗ-2111

Тип	ВАЗ-2111
Число цилиндров	4
Рабочий объем, л	1,499
Степень сжатия	9,8
Диаметр цилиндра, мм	82
Ход поршня, мм	71
Длина шатуна, мм	121
Частота вращения, мин-1	800 – 6000
Подача топлива	Бензин – форсункой на клапан Природный газ – форсункой во впускной коллектор
Зажигание	Свеча зажигания

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 2.3. В двигателе ВАЗ-2111 применялись алюминиевые стержни толщиной 1,2 мм с электроизолирующим слоем (применялось микродуговое оксидирование 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 2.4, а для двигателя ВАЗ – на рисунке 2.5, 2.6 и 2.7. В качестве топлива в УИТ-85 применяли сжатый природный газ (CNG) и бензин, а также природный газ с добавками водорода и бензин с добавками водорода [22, 23, 24]. А в двигателе ВАЗ-2111 применяли только CNG и бензин [25].

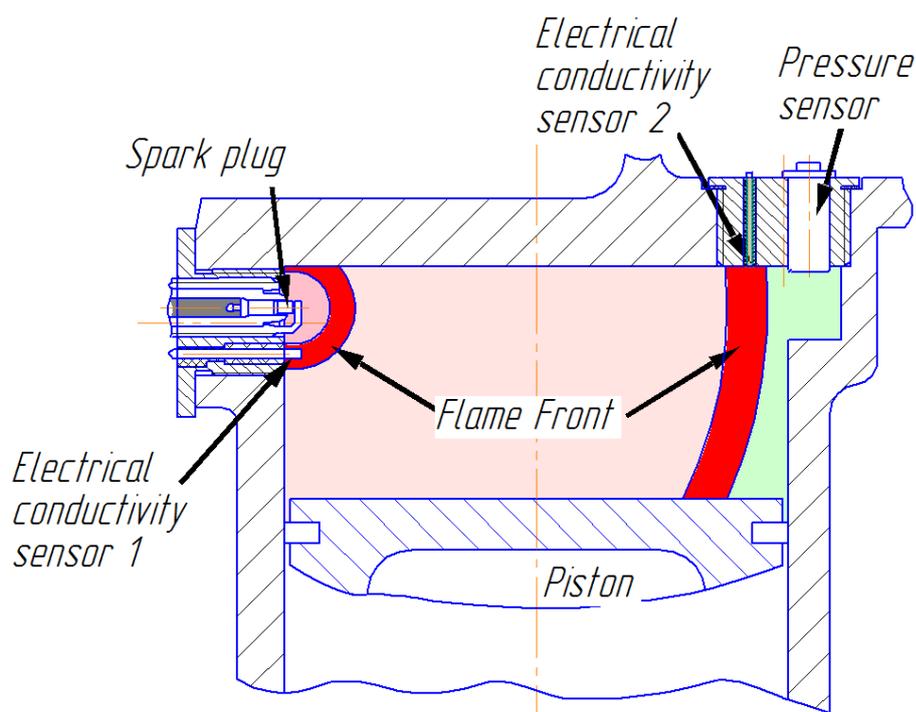


Рисунок 2.3 – Схема расположения датчиков для измерения электропроводности пламени в УИТ-85



а)

б)

в)

Рисунок 2.4 – 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.

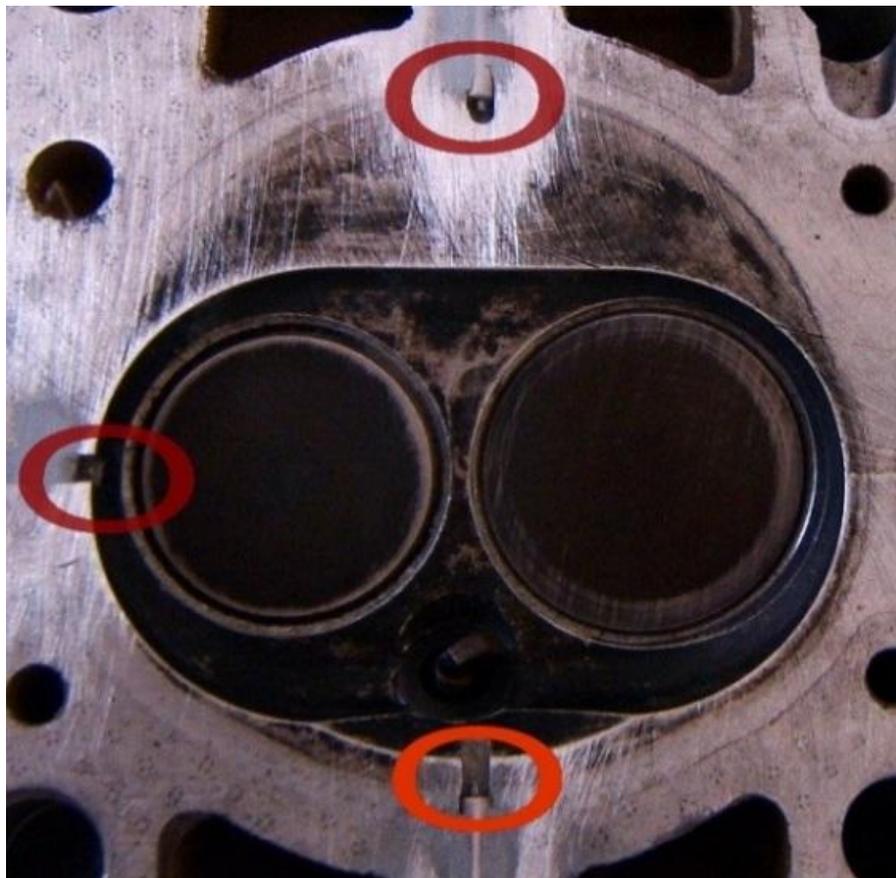


Рисунок 2.5 – Общий вид датчиков для исследования электропроводности пламени, в двигателе ВАЗ-2111: а) стальные датчики в керамической оболочке.

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

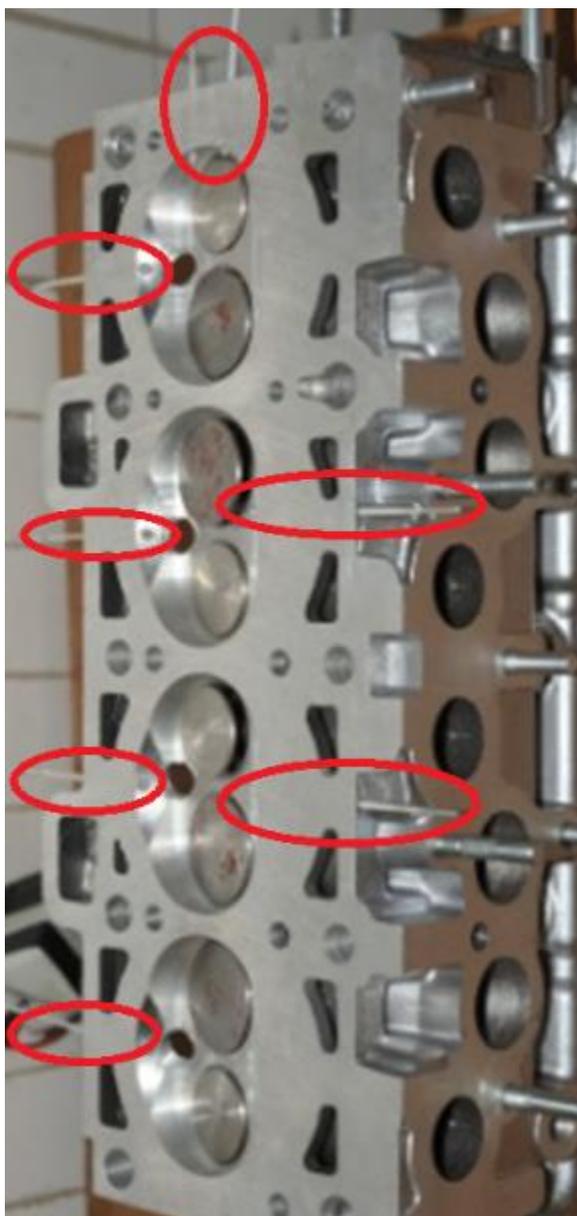


Рисунок 2.6 – Общий вид датчиков для исследования электропроводности пламени, в двигателе VAZ-2111: алюминиевые датчики в головке блока цилиндров.



Рисунок 2.7 – Общий вид датчиков для исследования электропроводности пламени, в двигателе ВАЗ-2111: алюминиевые датчики в специальной пластине.

Применяемая электрическая схема для измерения электропроводности пламени для установки УИТ-85 с пятиэлектродным датчиком (Рисунок 2.4в) при работе на бензине приведена на рисунке 2.8. Источником питания здесь являлся гальванический элемент +9 V. При работе УИТ-85 с датчиками (рисунок 2.4а и рисунок 2.4б) применялась электрическая схема, изображенная на рисунке 2.9, 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.

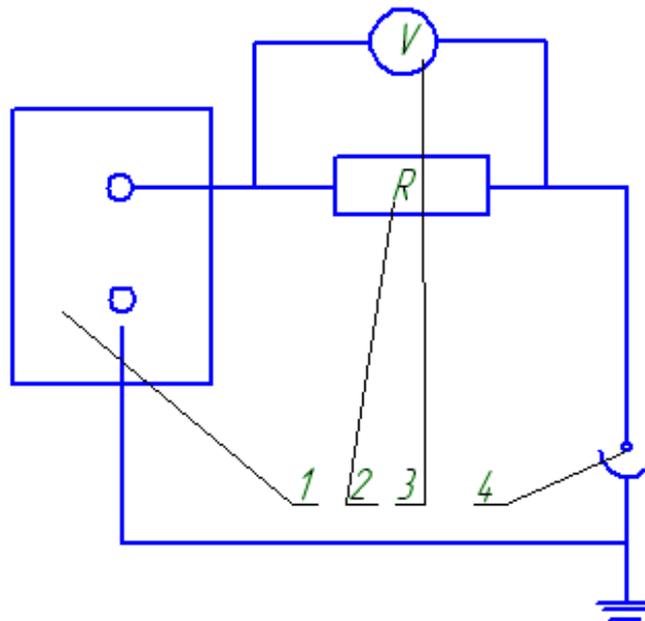


Рисунок 2.8 – Схема измерения электропроводности пламени: 1 – Источник постоянного тока «Крона» 9V; 2 – измерительный резистор; 3 – осциллограф; 4 - датчик электропроводности

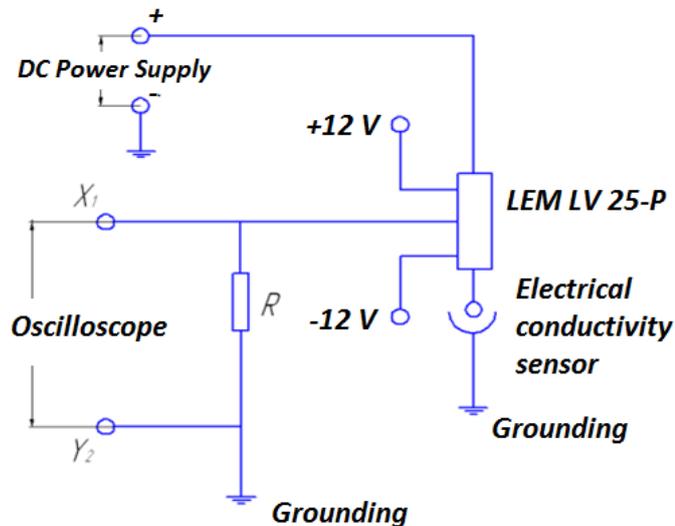


Рисунок 2.9 – Схема измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой

Исследования электропроводности пламени в двигателе ВАЗ проводились первоначально с датчиками, изображенными на Рисунке 2.5а и схеме измерения электропроводности пламени (Рисунок 2.9) с гальваническим элементом +9 V. Основные испытания проводились уже с алюминиевыми датчиками, представленными на Рисунке 2.6 и Рисунке 2.7, с

многоканальной схемой измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой (Рисунок 2.10) при питании от источника постоянного тока с напряжением 600 V.

Увеличение напряжения на датчиках для измерения электропроводности пламени с 360 до 600 V 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.

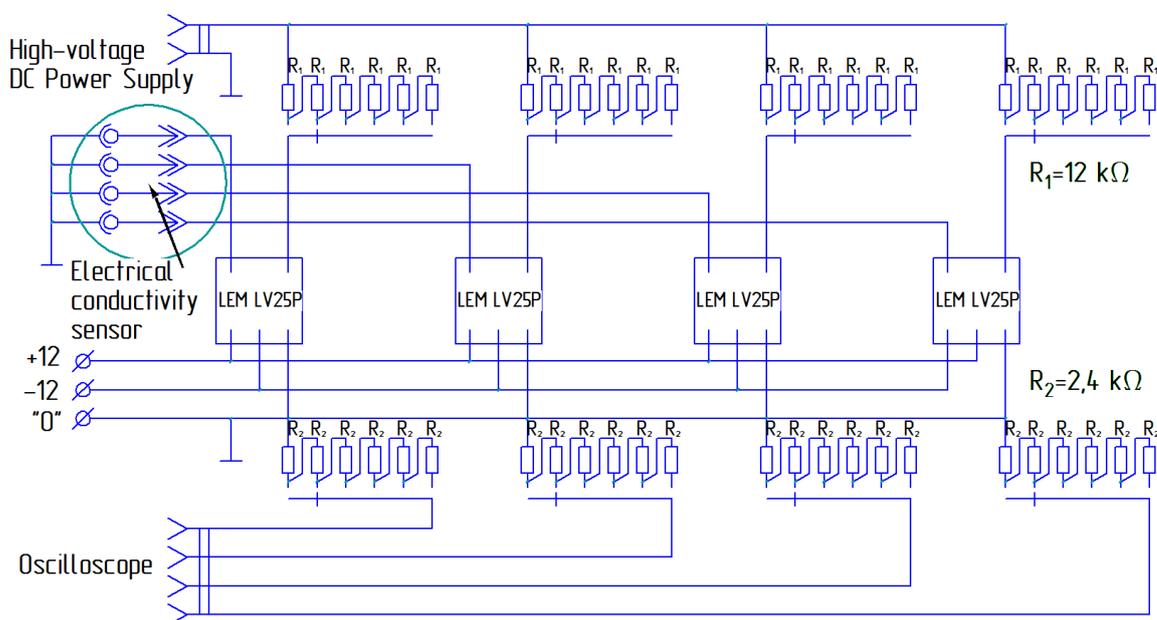


Рисунок 2.10 – Многоканальная схема измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой

А в на рисунке 2.11 представлена характеристика цепи ионизационного зонда показывающая линейность соотношения силы тока и напряжения в цепи ионизации.

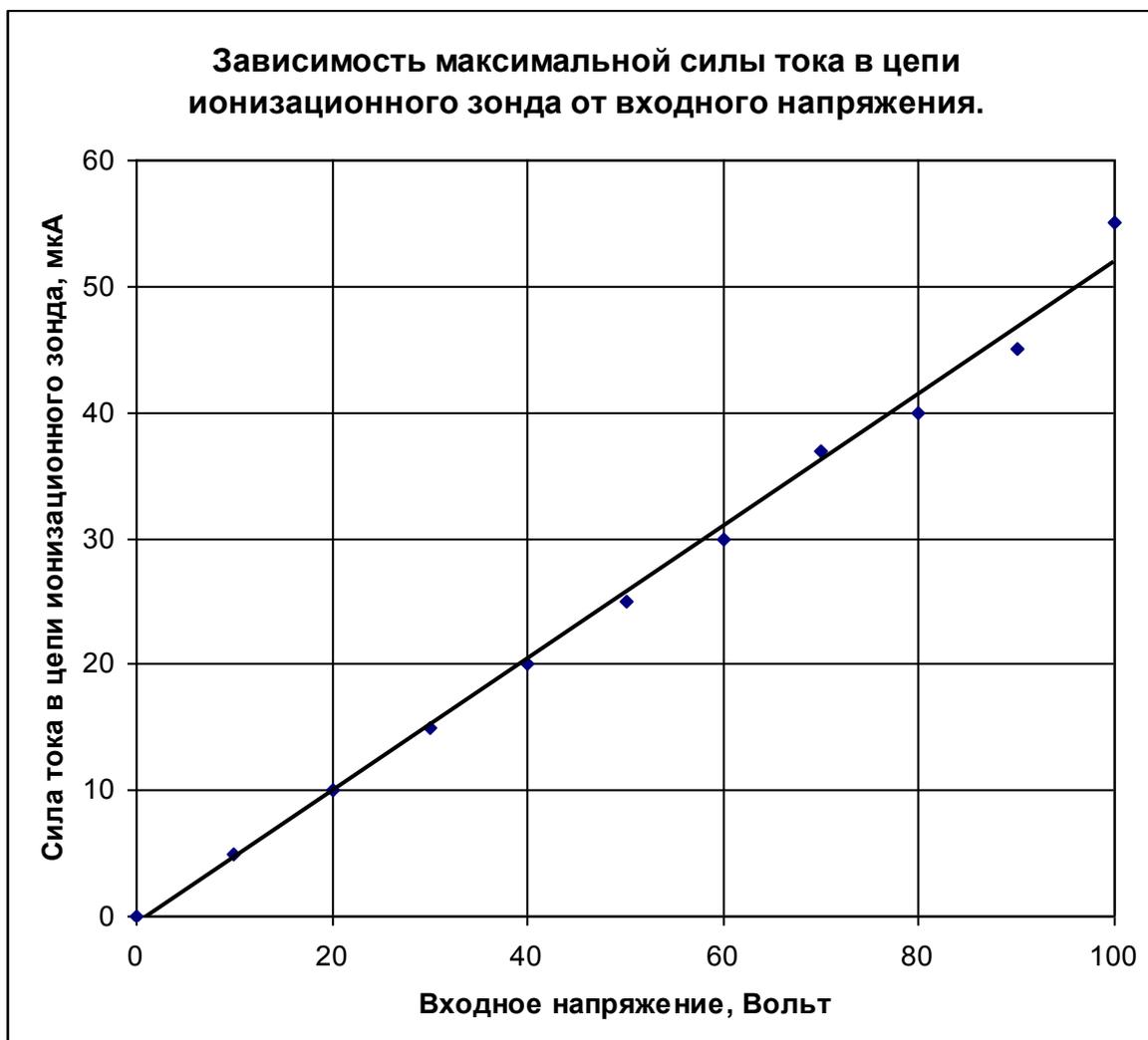


Рисунок 2.11 – Характеристика цепи ионизационного зонда

На рисунке 2.12 показан пример записи исследовательских сигналов на двигателе ВАЗ-2111 на бензине в при частоте вращения 880 мин^{-1} на режиме холостого хода, где 1 – сигнал с датчика давления; 2 – сигнал с датчика свечи зажигания; 3 – электропроводность в 15 мм от свечи зажигания; 4 – электропроводность в 45 мм от свечи зажигания

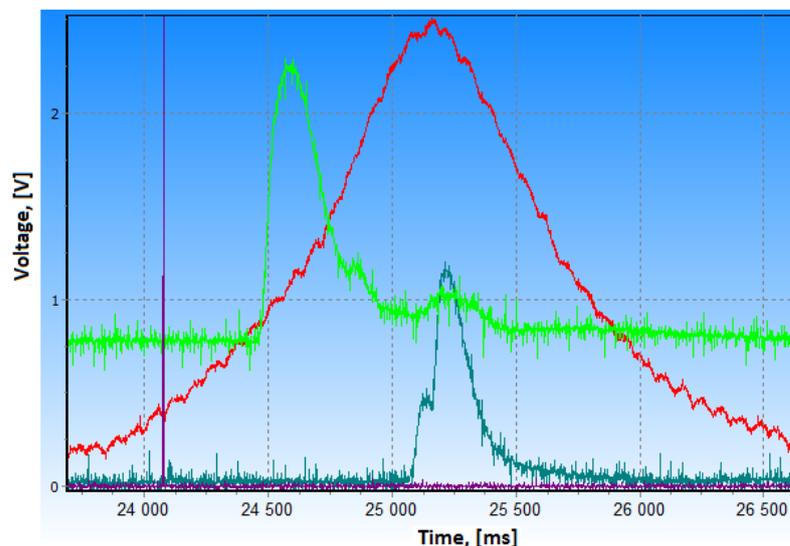


Рисунок 2.12 – Пример записи исследовательских сигналов на двигателе ВАЗ-2111 со степенью сжатия 7.5 на бензине в при частоте вращения 880 мин⁻¹ на режиме холостого хода

А на рисунке 2.13 показан пример записи эксперимента на ВАЗ-2111, где 1 – сигнал с датчика положения коленчатого вала; 2 – сигнал с датчика давления; 3 – участок пропуска зубьев, являющийся мертвой точкой.

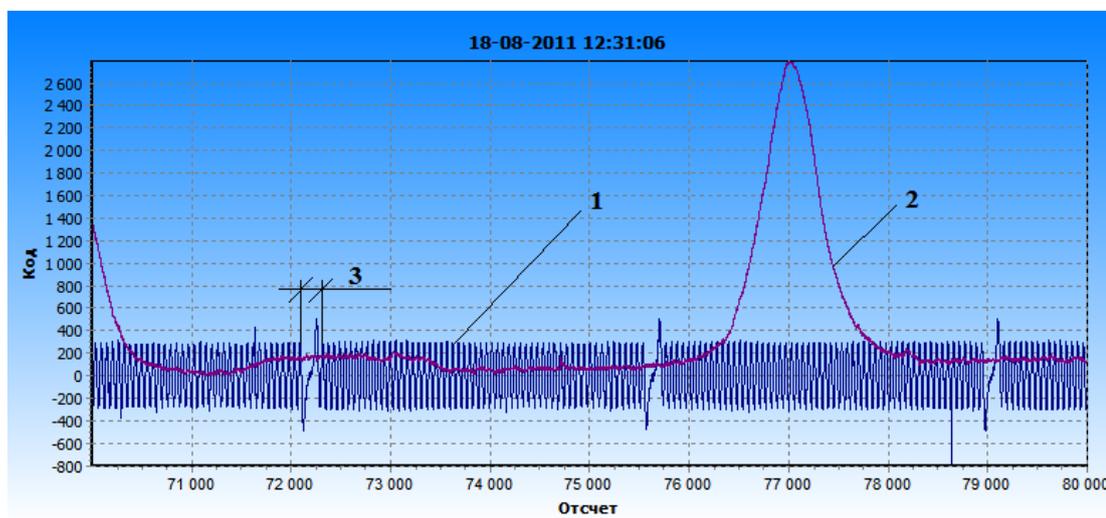


Рисунок 2.13 – Пример записи исследовательских сигналов на двигателе ВАЗ-2111 со степенью сжатия 9.8 на бензине в при частоте вращения 880 мин⁻¹ на режиме холостого хода

ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью выявления особенности применение водорода для повышения эффективности процесса сгорания бензинового ДВС на режиме холостого хода

3.1 Результаты экспериментальных исследований

На работу двигателя на режиме холостого хода большое влияние оказывает степень разбавленности рабочей смеси остаточными газами [16]. Количество остаточных газов зависит от положения дроссельной заслонки, которая создает разрежение во впускном трубопроводе.

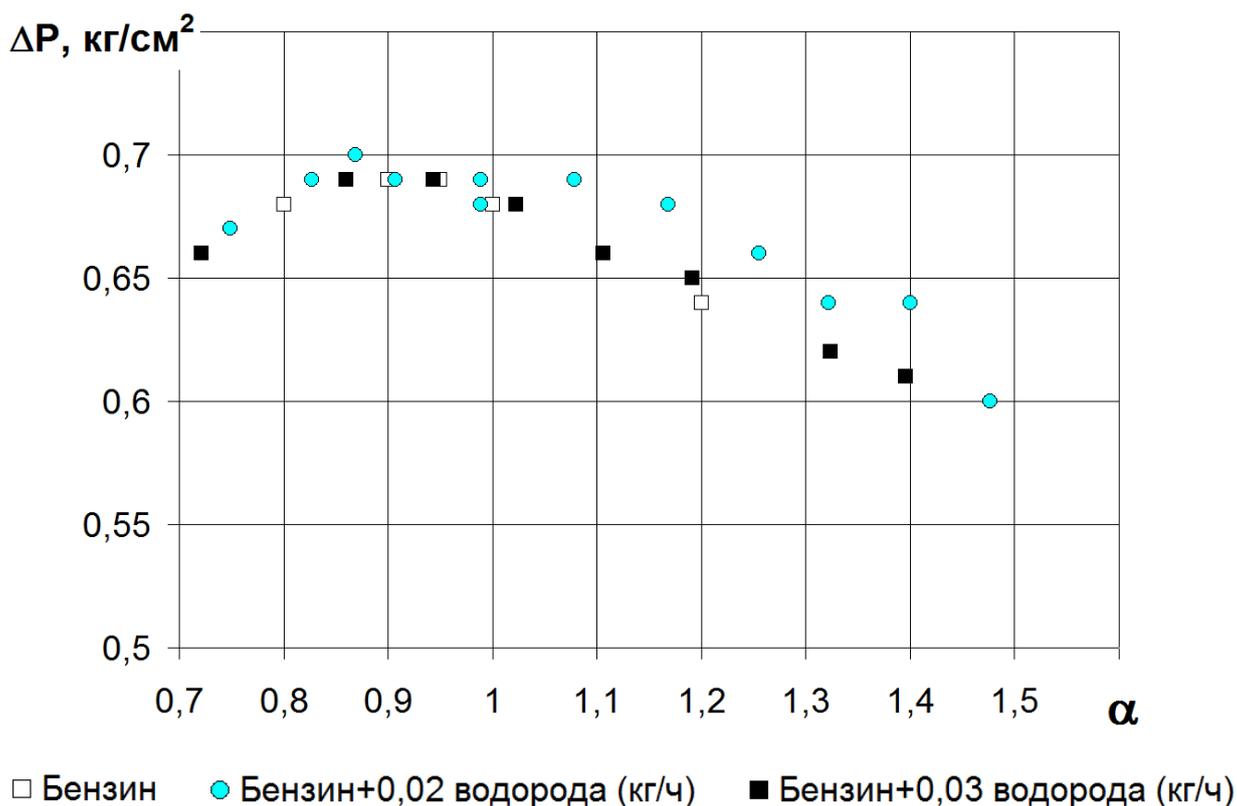


Рисунок 3.1 – Разрежение во впускном трубопроводе на режиме холостого хода в двигателе ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водорода, при степени сжатия 9,8

На рисунке 3.1 и 3.2 представлено разряжение во впускном трубопроводе на режиме холостого хода двигателя ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водорода, для степени сжатия 9,8 (рисунок 3.1) и 7,5 (рисунок 3.2). Из рисунка 3.1 видно, что при работе на бензине и бензине с водородом разряжение находится в области одной кривой которая уменьшается при обеднении смеси. Это связано с большим открытием дроссельной заслонки. Добавка водорода повышает эффективность процесса сгорания и на богатых смесях заслонка для бензина с водородом закрывается полностью. При работе двигателя при степени сжатия 7,5 наблюдается схожая картина. При работе на бензине с водородом разряжение находится в области одной кривой, а при работе на бензине требуется большее открытие дроссельной заслонки, для устойчивой работы двигателя, в связи с уменьшением эффективности процесса сгорания при уменьшении степени сжатия.

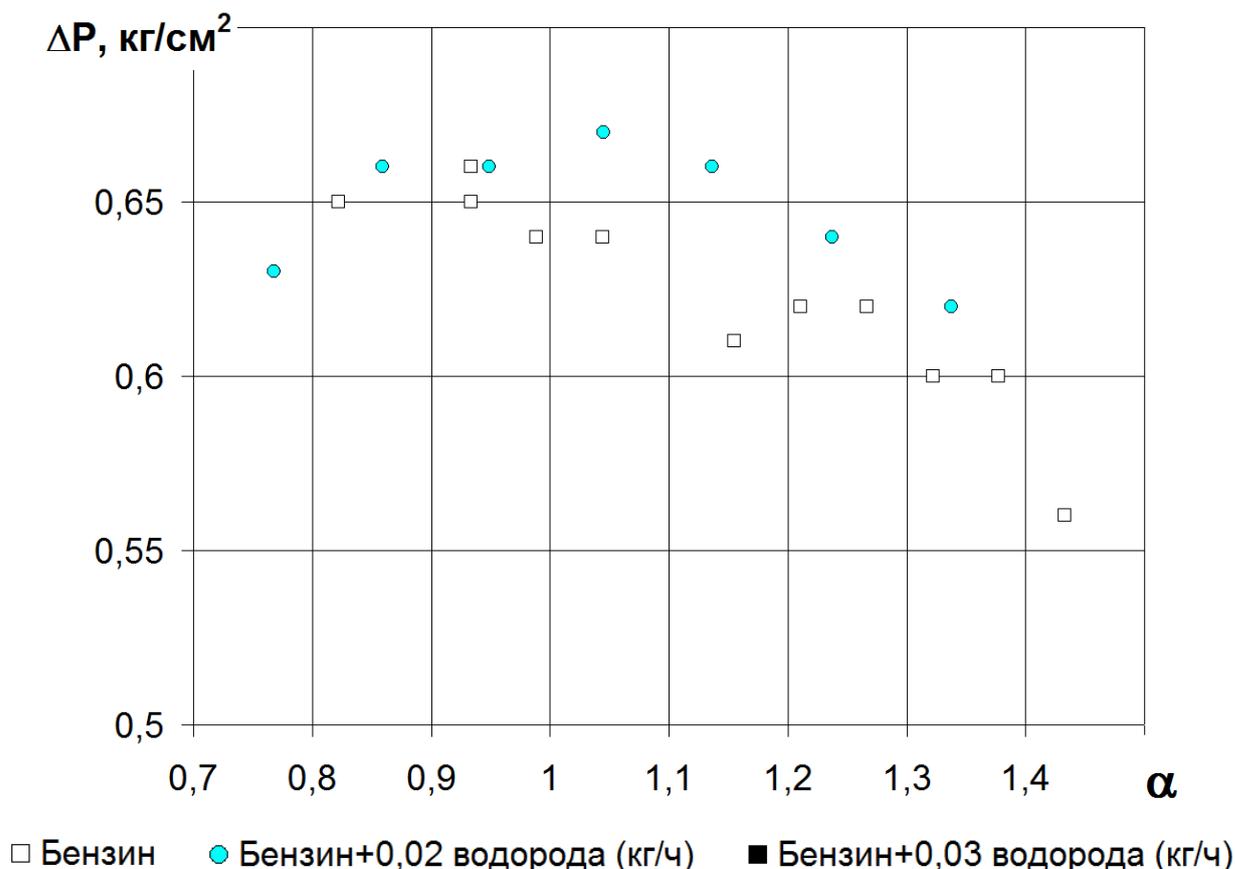


Рисунок 3.2 – Разряжение во впускном трубопроводе на режиме холостого хода в двигателе ВАЗ-2111 при работе на бензине, при степени сжатия 7,5

Характеристику разряжения во впускном трубопроводе дополняют результаты характеристики расхода воздуха, представленные на рисунке 3.3 и 3.4. В целом характеристика расхода воздуха соответствует показаниям разряжения во впускном трубопроводе. При большем разряжении больше сопротивление и меньше расход воздуха, то есть в цилиндре двигателя больше доля остаточных газов, затрудняющих нормальное протекание процесса сгорания. Из рисунка 3.3 видно, что характеристика расхода воздуха для бензина лежит на одной кривой, а при добавке водорода часть воздуха вытесняется, что соответствует снижению расхода воздуха. Для степени сжатия 7,5 (рисунок 3.4) наблюдается схожая картина, только для обеспечения устойчивой работы двигателя расход воздуха несколько выше, чтобы компенсировать потери от меньшей эффективности процесса сгорания при снижении степени сжатия.

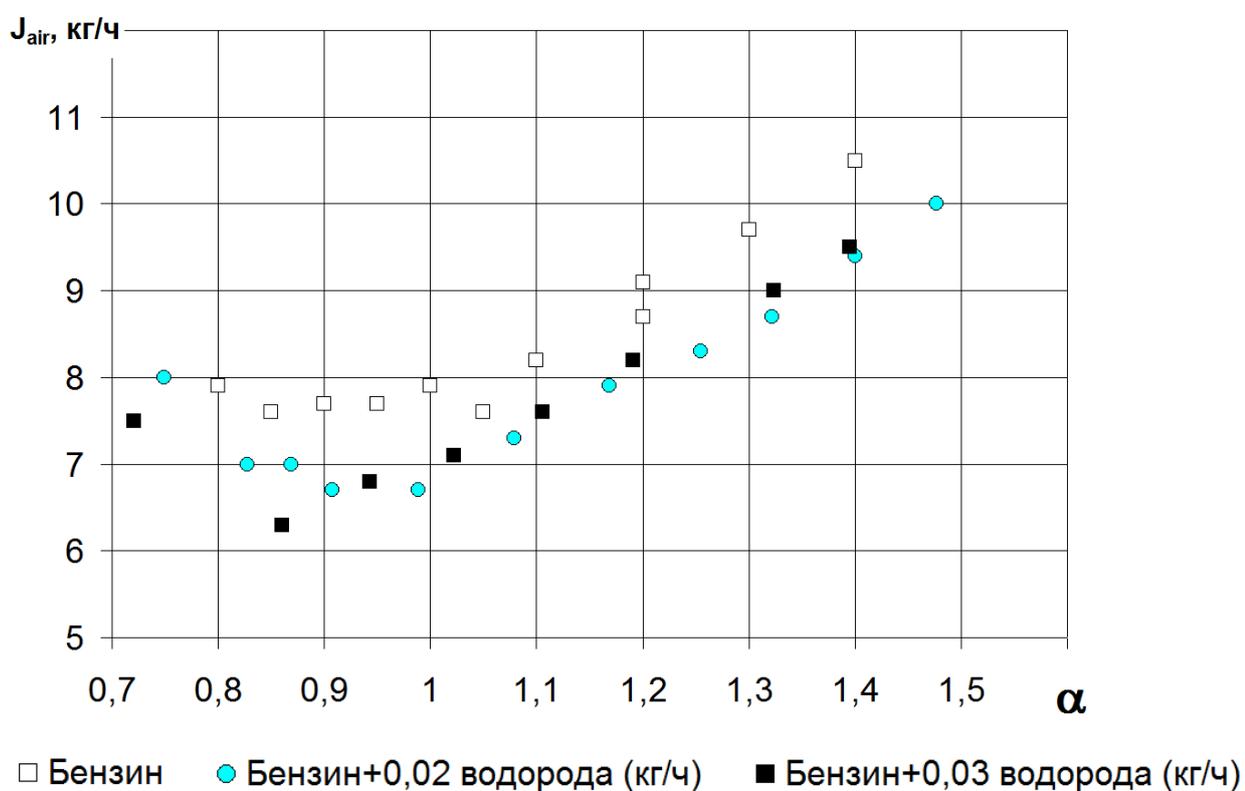


Рисунок 3.3 – Расход воздуха на режиме холостого хода в двигателе ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водорода, при степени сжатия 9,8

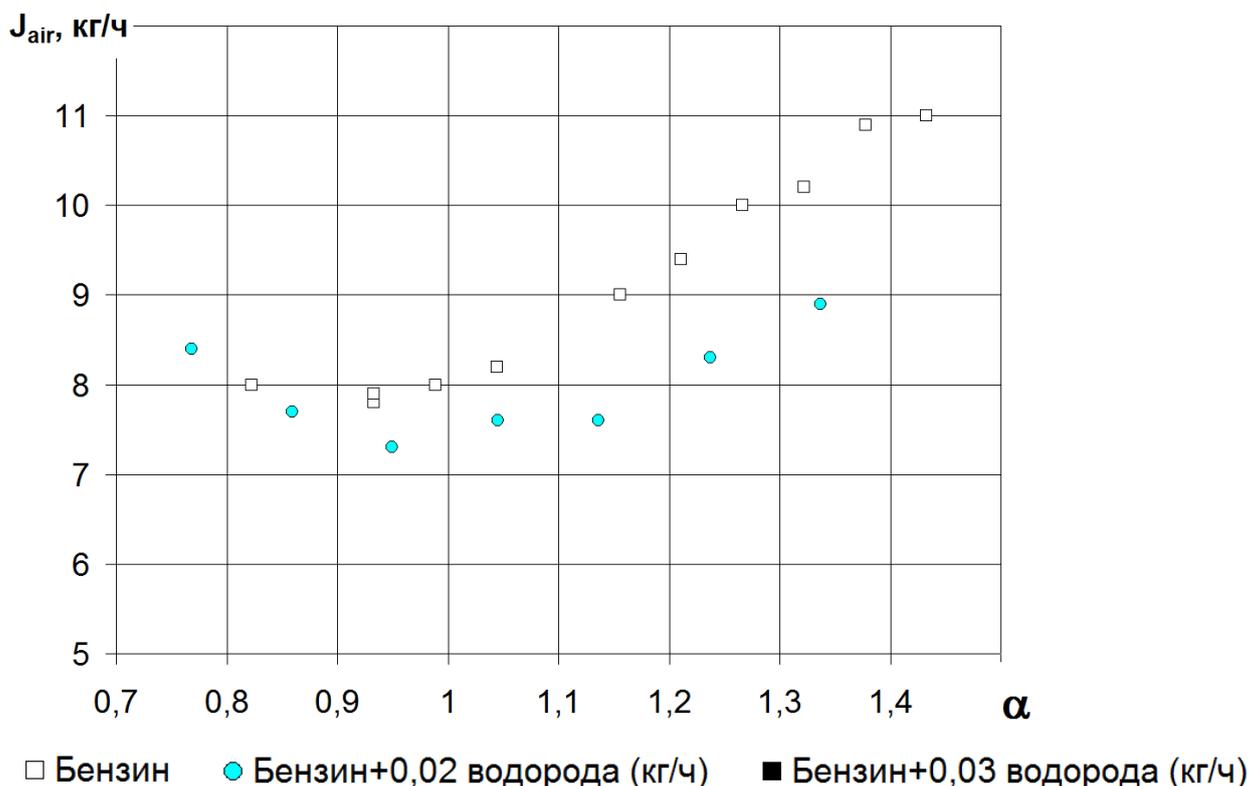


Рисунок 3.4 – Расход воздуха на режиме холостого хода в двигателе ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водорода, при степени сжатия 7,5

Рассмотрим влияние вида топлива на токсичность при работе двигателя на холостом ходу при степени сжатия 9,8 и 7,5. На рисунке 3.5 представлена концентрация СН в отработавших газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Из рисунков 3.5а и 3.5б видно, что токсичность по СН при работе на КПП и бензине находится на одной кривой и слабо зависит от степени сжатия. Добавка водорода в бензин приводит к некоторому снижению токсичности [17]. Значительное снижение токсичности по СН наблюдается при добавке водорода в КПП. Что заметно для обеих рассматриваемых степеней сжатия. Это объясняется лучшей активацией процесса сгорания природного газа в начальной фазе сгорания. В основной фазе сгорания КПП за счет своей более высокой диффузионной активности позволяет осуществить быстрое и полное сгорание [18].

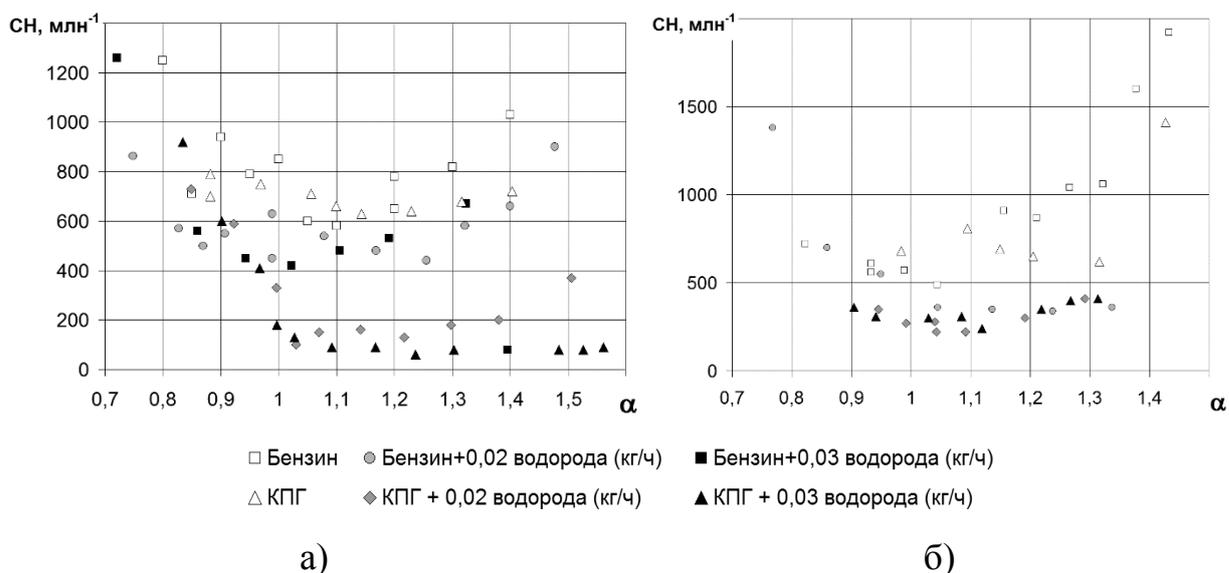


Рисунок 3.5 – Концентрация СН в отработавших газах на режиме холостого хода в двигателе ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водорода, КПГ :
КПГ с водородом: (а) степень сжатия 9,8; (б) степень сжатия 7,5

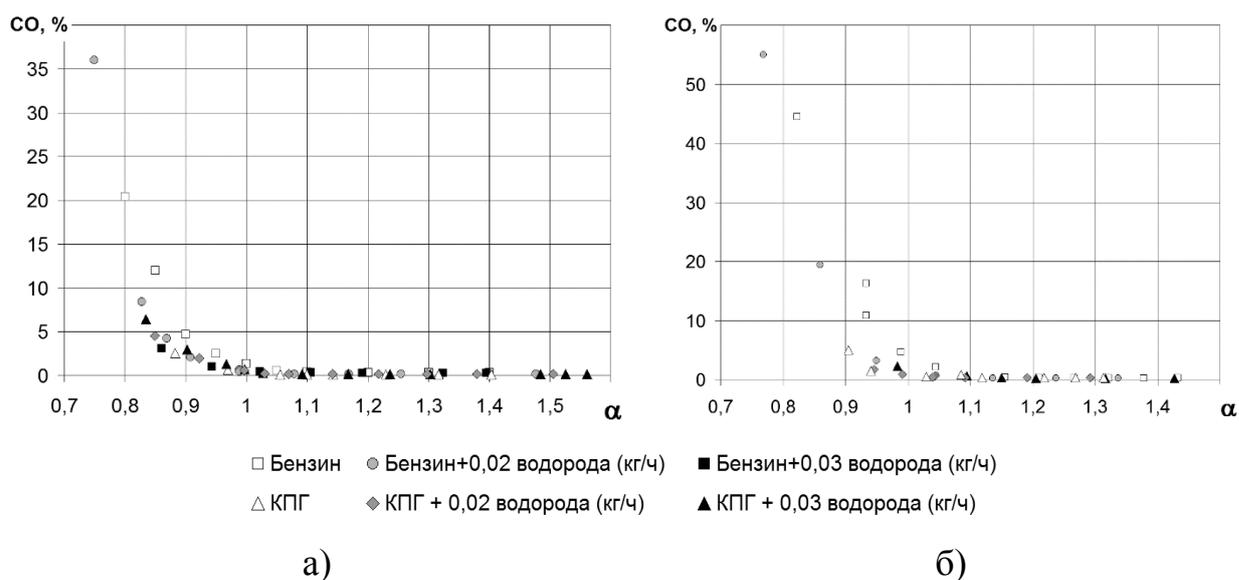


Рисунок 3.6 – Концентрация СО в отработавших газах на режиме холостого хода в двигателе ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водорода, КПГ и КПГ с водородом: (а) степень сжатия 9,8; (б) степень сжатия 7,5

На рисунке 3.6 представлена концентрация СО, для степени сжатия 9,8 и 7,5. Для бедных смесей (от 1 до 1,6) при степени сжатия 9,8 концентрация СО колеблется в интервале от 0,15 до 0,3% причем нижние значения соответствуют работе на КПГ и при добавке водорода как в CNG, так и в

бензин. При работе на бензине СО составляет от 0,28 до 0,4%. В зоне богатых смесей также наблюдается более высокая токсичность у бензина, чем у других вариантов топлива. При степени сжатия 7,5 картина в целом похожа, только в зоне бедной смеси значения по СО уже лежат в одном диапазоне от 0,24 до 0,42 для всех видов топлива. Для богатой смеси картина схожа, только при снижении степени сжатия токсичности по СО возросла. Такие результаты показывают, что при снижении степени сжатия в забалластированной рабочей смеси остаточными газами снижается полнота сгорания топлива, это и отражается в увеличении концентрации СО в отработавших газах.

На рисунке 3.7 представлена концентрация NO_x , для степени сжатия 9,8 и 7,5.

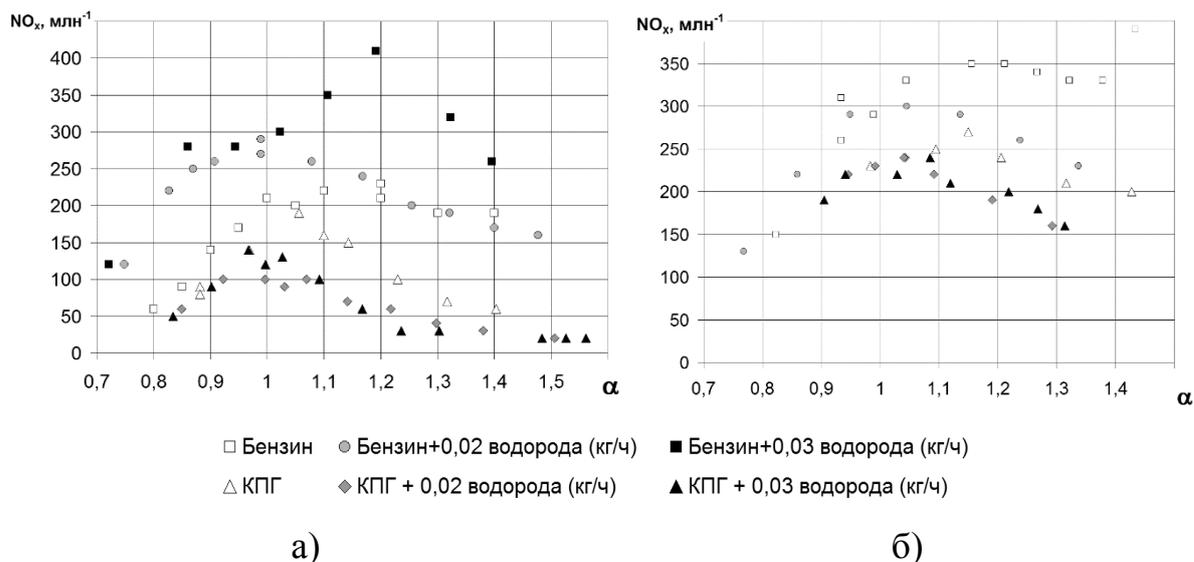


Рисунок 3.6 – Концентрация NO_x в отработавших газах на режиме холостого хода двигателя ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водорода, КПГ и КПГ с водородом: (а) степень сжатия 9,8; (б) степень сжатия 7,5

Для степени сжатия 9,8 характерна следующая картина, при добавке водорода в бензин происходит заметное повышение токсичности по NO_x , для всех коэффициентов избытка воздуха. Это показывает увеличение скорости

тепловыделения при добавке водорода, для одинакового положения дроссельной заслонкой. В тоже время при добавке водорода в КПП наблюдается снижение NO_x , в зоне бедных смесей (от 1 до 1,5), это происходит за счет большего закрытия дроссельной заслонки и уменьшения наполнения цилиндров. Таким образом хоть водород и увеличивает скорость тепловыделения, но за счет уменьшения количества введенного в цилиндр двигателя тепла с топливом при увеличении концентрации остаточных газов, температура в процессе сгорания снижается. Это и отражается снижением NO_x . Эти результаты хорошо иллюстрируются рисунком 8б, где видно, что при добавке водорода и большем закрытии дроссельной заслонки, обеспечивается снижение NO_x , как для КПП, так и для бензина. Этот эффект особенно заметен на бедных смесях, где концентрация NO_x , ограничивается только температурой процесса сгорания.

Глава 4 Выявление возможности повышения эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода

Анализ характеристики тепловыделения в двигателях ВАЗ-11183 и ВАЗ-2111 с пониженной степенью сжатия показал наличие значительной неравномерности протекания процесса сгорания (рисунок 2.2б, 2.3б) при этом интенсивность тепловыделения во многом зависела от состава остаточных газов и их реакционной способности, которые значительно отличались от цикла к циклу. Получено, что увеличение реакционной активности смеси можно обеспечить через добавку водорода в бензовоздушную смесь (рисунок 2.2в, 2.3в), что приводит к стабильности протекания процесса сгорания, в том числе и за счет большей равномерности состава остаточных газов и идентичности состава рабочего тела в последовательных циклах сгорания на установившихся режимах работы при глубоком дросселировании.

Анализ и обработка экспериментальных данных показали, что одним из интегральных характеристик протекания термодинамических процессов является показатель политропы, изменение которого отражает изменение в направлении и интенсивности теплового потока в рассматриваемых процессах. На рисунке 4.1 представлены схематические изменение показателя политропы и отмечены основные точки изменения поведения термодинамической системы. На участке от начала процесса сжатия до характерной точки 1, где показатель политропы сжатия становится равен показателю адиабаты, происходит нагрев рабочей смеси от стенок цилиндра двигателя, и в процессе сжатия тепловой поток от стенок цилиндра уменьшается и становится равен 0 в точке 1. На участке от точки 1 до точки 2 происходит теплоотвод от сжимающегося рабочего тела через стенки цилиндра. Точка 2, где показатель политропы и адиабаты опять сравниваются, характеризуется тем, что количество теплоты выделяемого в

процессе сгорания становится равным количеству теплоты, уходящему через стенки цилиндров. На участке от точки 2 до ВМТ, соответствующей 360 град. ПКВ, происходит процесс сгорания на такте сжатия и показатель политропы стремится к бесконечности, т.е. к изохорному процессу подвода теплоты, который протекает в ВМТ. На участке от ВМТ до точки 3 показатель политропы принимает отрицательные значения, характерные активному тепловыделению на такте расширения, а точка 3, где $n = 0$ соответствует максимальному давлению в цилиндре двигателя. На участке от точки 3 до точки 5, где показатель политропы становится равен показателю адиабаты расширения, происходит процесс догорания ТВС на такте расширения, при этом в точке 4 показатель политропы становится равен 1, что характеризует изотермический процесс. Участок от точки 5 и до процесса выпуска характеризуется зоной выполаживания, где завершаются процессы горения, и прямолинейно увеличивающимся участком, характеризующимся увеличением теплоотода в процессе расширения, вследствие увеличения площади охлаждаемой поверхности.

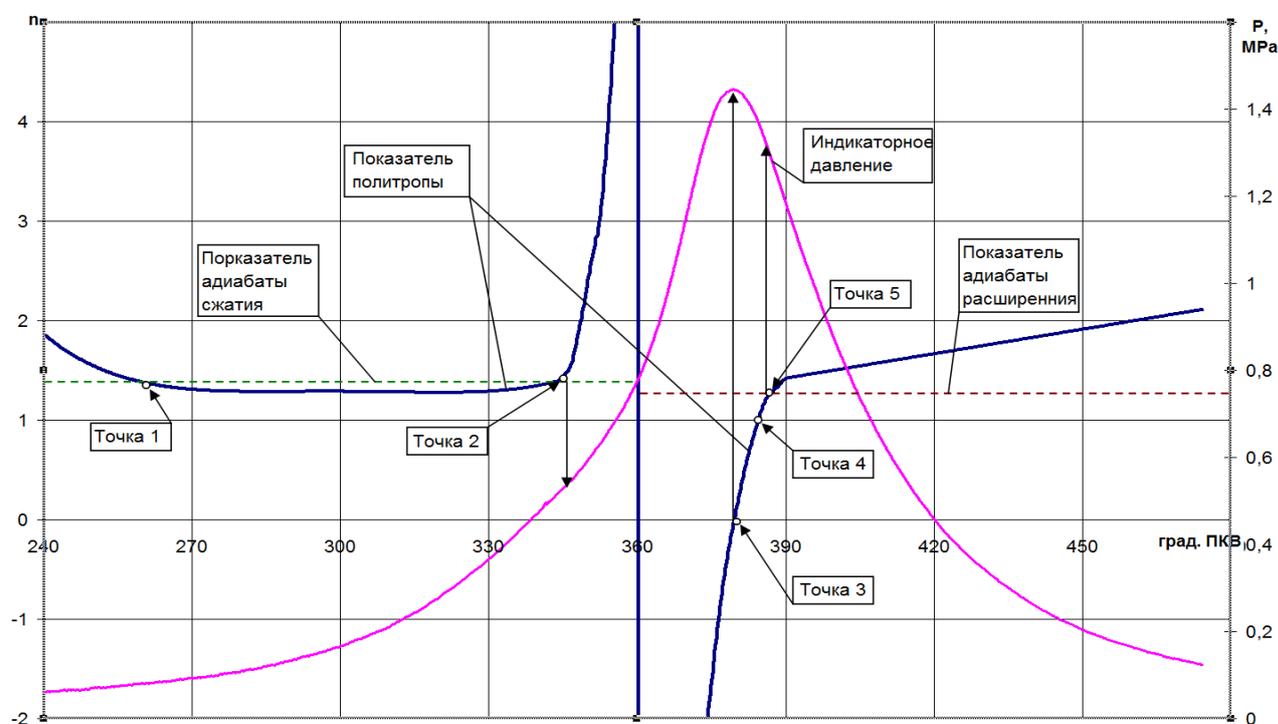
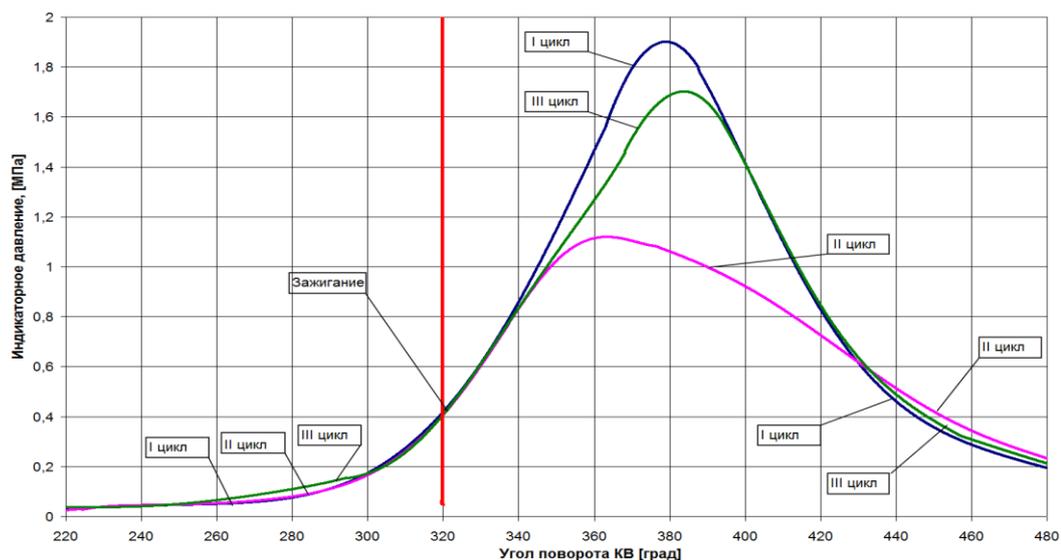


Рисунок 4.1 – Схема изменения показателя политропы действительного цикла ДВС с искровым зажиганием

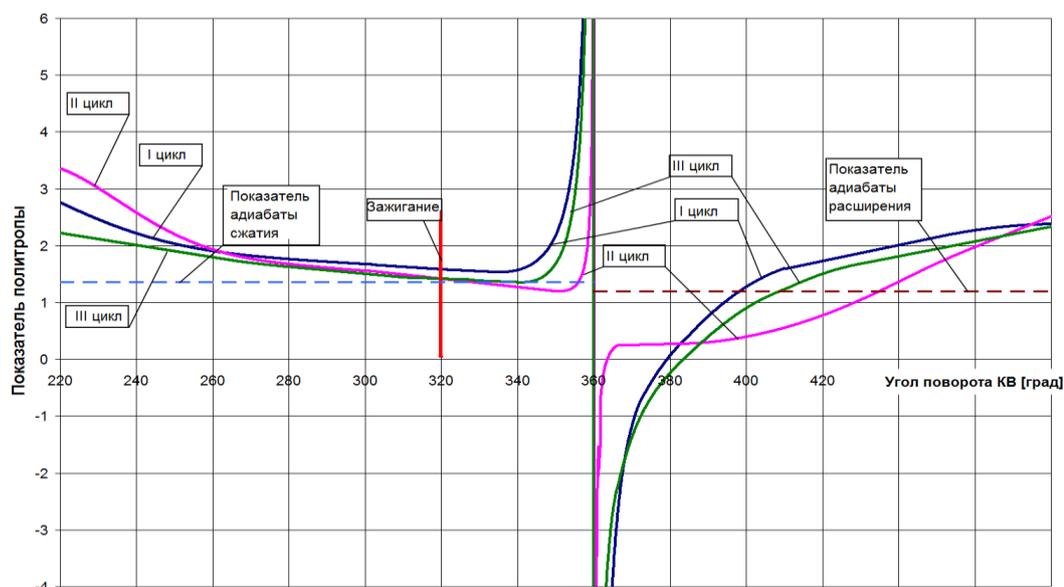
Проведена оценка термодинамических процессов и их интенсивности для трех последовательных циклов на каждом исследуемом режиме работы двигателя при глубоком дросселировании и составе топлива через анализ изменения показателя политропы в процессах сжатия, сгорания и расширения (рисунок 4.2). При этом показано:

- показатель политропы сжатия и расширения значительно отличается от принятых значений при выполнении расчетов для режимов полной нагрузки, в частности, значения политропы сжатия варьируется в диапазоне от 1,8 до 2,3, а политропа расширения в диапазоне от 1,5 до 1,8.
- в циклах с пропуском зажигания или частичным сгоранием наблюдается значительный участок показателя политропы расширения со значениями ниже 1, что характеризует процесс догорания или частичного сгорания при значительном расширении рабочего тела.

Таким образом, фактические значения политроп в процессах сжатия, сгорания и расширения при работе двигателя на режимах дросселирования, и в частности, на режиме холостого хода существенно отличается от принятых значений, что в свою очередь необходимо учитывать при выполнении расчетов ДВС. Оценка изменения показателя политропы сжатия позволяет выявить участок с показателем политропы равным показателю адиабаты, при условии равенства температуры рабочего тела и стенки цилиндра двигателя. Это позволяет из уравнения состояния для этого участка определить количество рабочей смеси в цилиндре двигателя, состоящей из остаточных газов и свежей смеси, количество которой определяется по датчикам расхода воздуха и топлива. Тем самым, исследования изменения термодинамических характеристик на режимах глубокого дросселирования поршневых двигателей и установок, для выявления возможностей повышения эффективности процесса сгорания, являются чрезвычайно актуальными.



а)

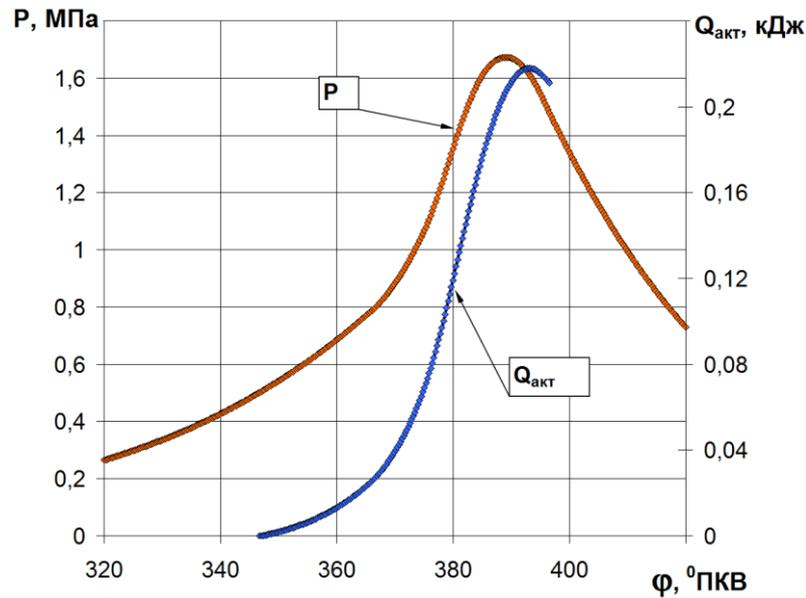


б)

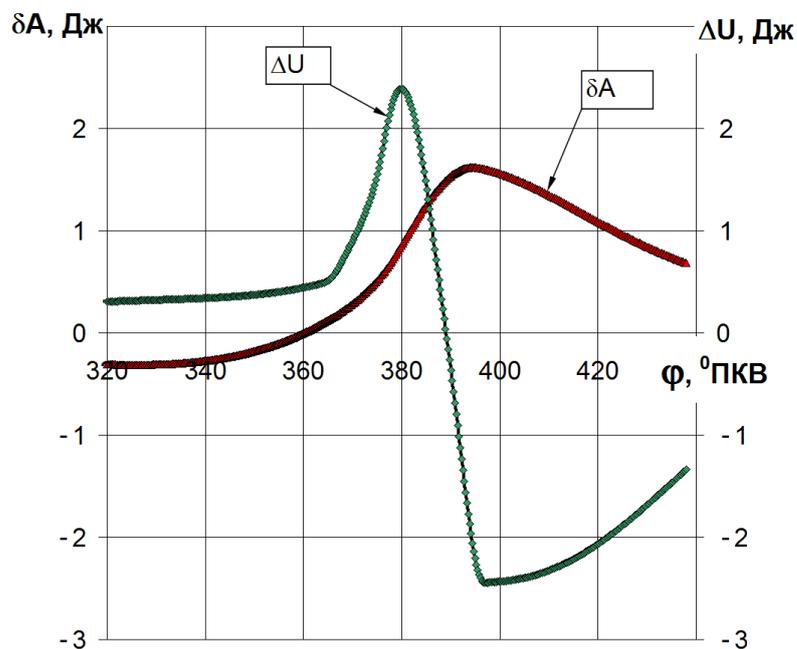
Рисунок 4.2 – Оценка в процессе сжатия, сгорания и расширения трех последовательных циклов на режиме холостого хода: (а) изменения давления; (б) показателя политропы.

Результаты обработки экспериментальных данных для УИТ-85, по предложенной методике, представлены на рисунке 4.3. На рисунке 4.3а приведены индикаторная диаграмма изменения давления в цилиндре двигателя, и характеристика изменения активного тепловыделения, являющегося суммой изменения внутренней энергии и работы с момента начала сгорания. На рисунке 4.3б приведены диаграммы изменения работы и

изменения внутренней энергии для каждого элементарного участка с шагом в 0,2724 градуса угла поворота. Количество введенной с топливом теплоты на данном режиме работы за один цикл составляет 343,111 Дж.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания в УИТ-85 при $\alpha = 1,0052$: (а) индикаторное давление и характеристика активного тепловыделение; (б) работа газа и изменение внутренней энергии на элементарном участке

Проводя анализ изменения количества теплоты, затраченной на увеличение внутренней энергии и совершение работы, следует отметить некоторое её уменьшение в конце сгорания. Это характеризуется наличием теплопередачи в стенку. Величина теплопередачи в стенку на данном участке больше энергии, выделяемой топливом в конце процесса сгорания. Общую величину тепловых потерь от теплопередачи в стенку можно оценить, как разницу максимума активного тепловыделения и энергии, подведенной с топливом.

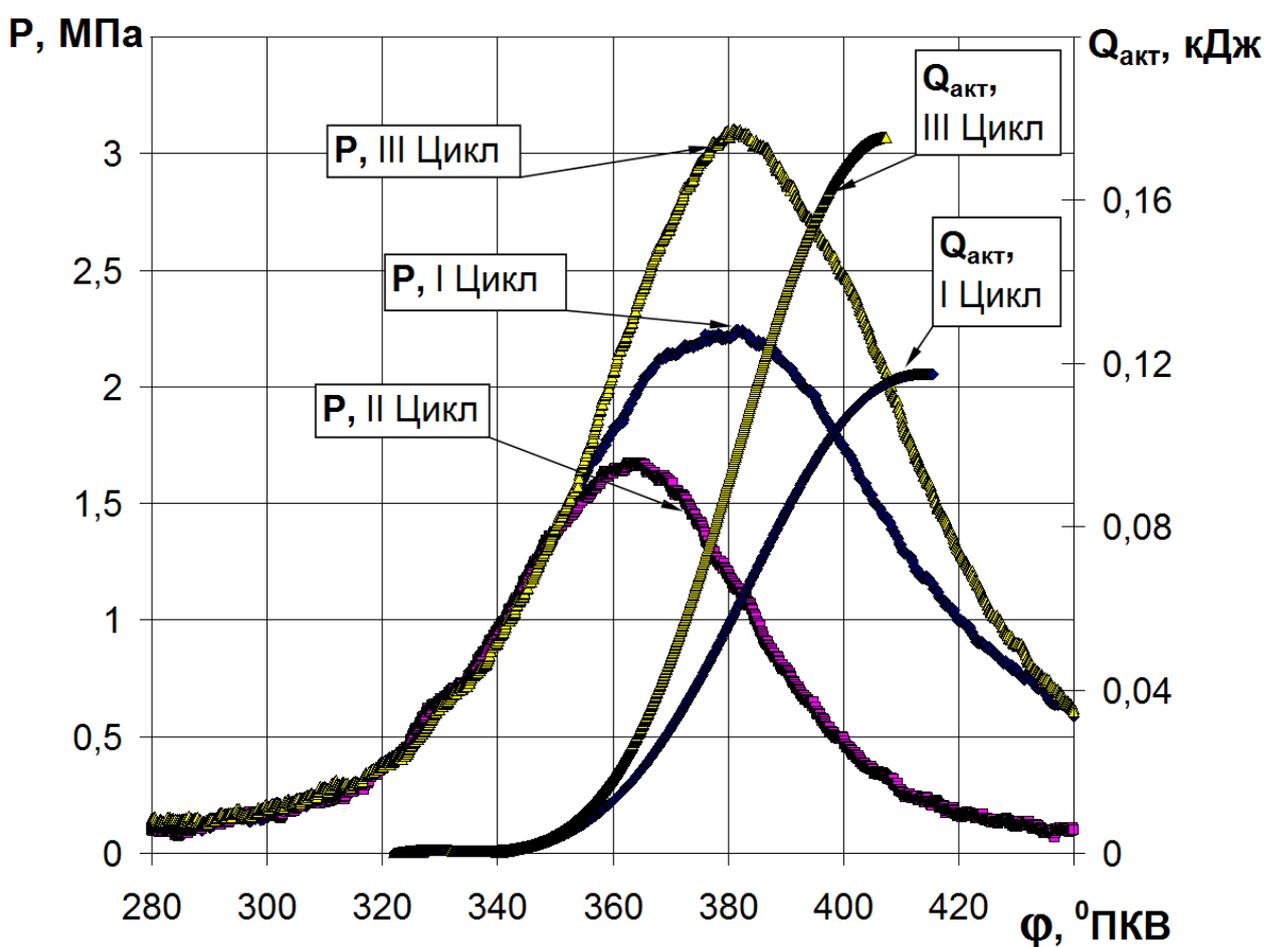


Рисунок 4.4 – Индикаторное давление и характеристика активного тепловыделения в двигателе ВАЗ-2111 при $\alpha = 1,0168$

На рисунке 4.4 и 4.5 приведены основные характеристики тепловыделения в процессе сгорания для двигателя ВАЗ-2111 на режиме

холостого хода при коэффициенте избытка воздуха 1,0168. На рисунке 4.4 приведены индикаторные диаграммы для трех рассматриваемых циклов, а также характеристики активного тепловыделения для первого и третьего цикла, так как у второго наблюдается пропуск зажигания. А на рисунке 4.5 представлены диаграммы работы газа и изменения внутренней энергии для каждого элементарного участка с шагом в 0,1073 градуса угла поворота. Количество подведенной с топливом теплоты за один цикл, в данном случае, составляет 233,358 Дж.

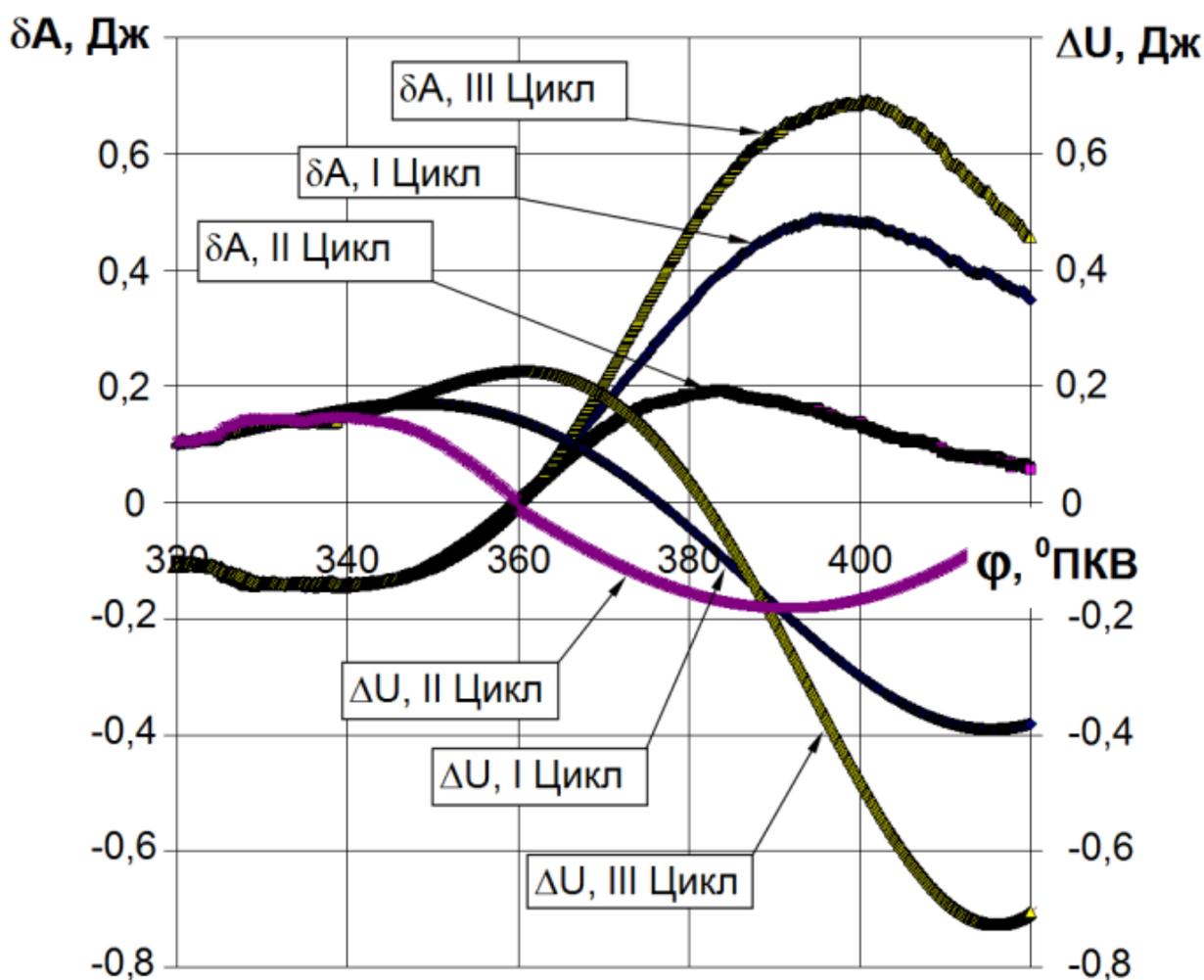
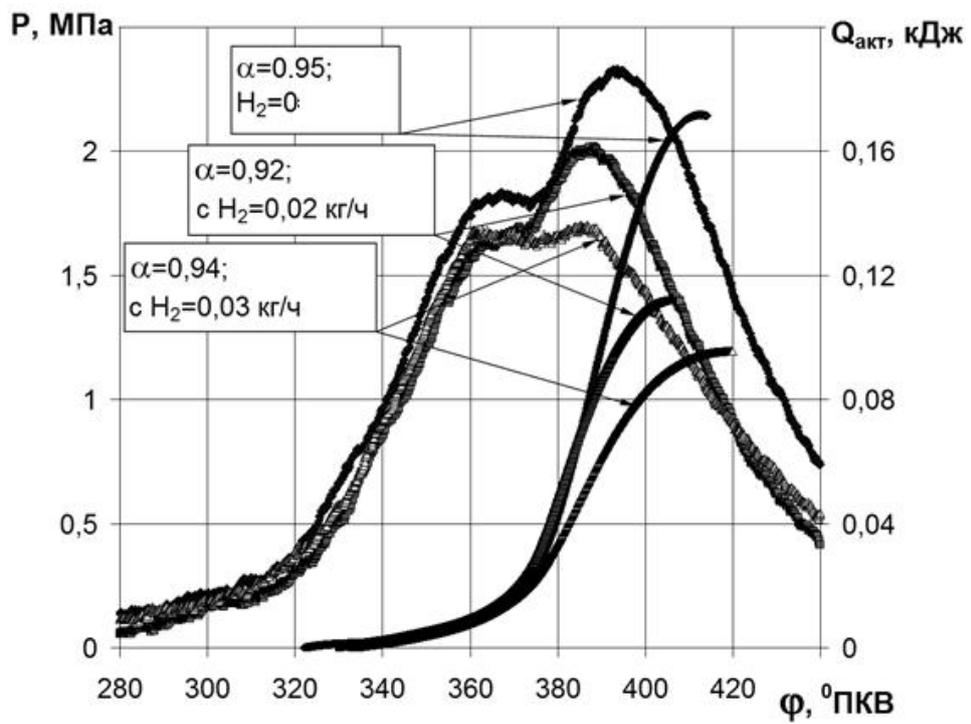


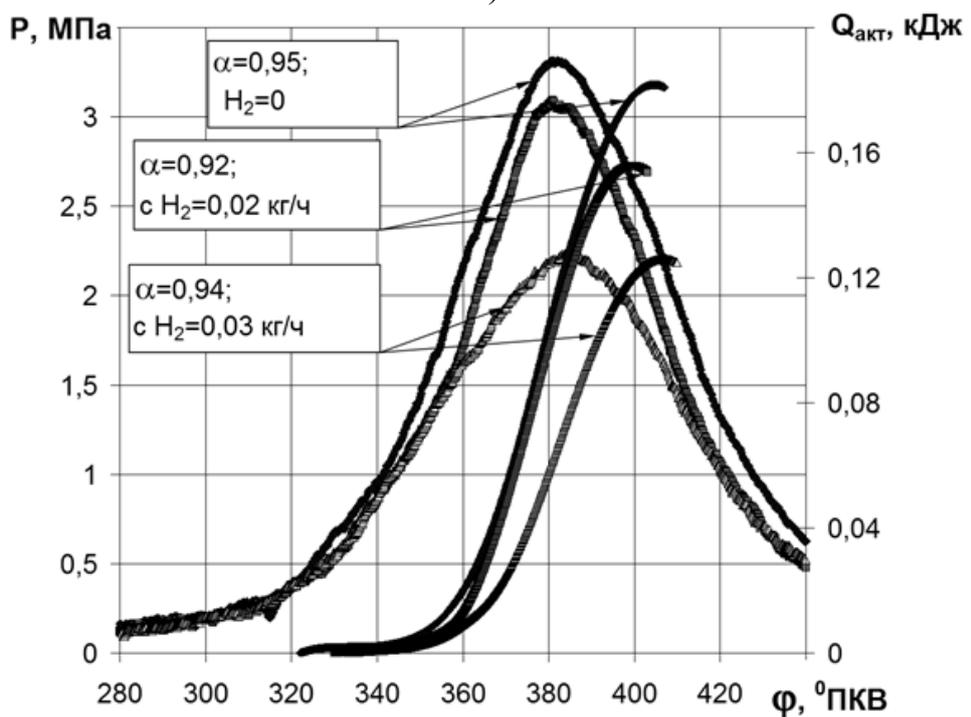
Рисунок 4.5 – Работа газа и изменение внутренней энергии на элементарном участке в двигателе ВАЗ-2111 при $\alpha = 1,0168$

Анализируя полученные параметры тепловыделения на режиме холостого хода, для конвертированного на природный газ двигателя ВАЗ-2111, можно отметить, что наблюдается значительная неравномерность процесса сгорания (рисунок 4.4 и 4.5). После первого цикла с нормальным процессом сгорания, как правило наблюдается пропуск зажигания, в результате чего, в следующем третьем цикле, в значительной мере, остаточные газы насыщены горючей смесью и продуктами неполного сгорания, что повышает реакционную способность смеси и её энергоёмкость. Это выражается большими значениями индикаторного давления, количества активно выделившейся энергии (рисунок 4.4) и соответственно, работы газа и внутренней энергией на элементарном участке (рисунок 4.5). Для второго цикла, с пропуском зажигания, наблюдаются практически равные значения работы газа и изменения внутренней энергии, что характеризует отсутствие устойчивого процесса горения на данном режиме (рисунок 4.5).

На рисунках 4.6, 4.7 и 4.8 представлена оценка изменения индикаторного давления и количества активно выделившейся энергии у первого и третьего рассматриваемых циклов для коэффициентов избытка воздуха 0,95, 1 и 1,1 соответственно. Первый цикл характеризуется, как правило, предшествующим циклом с полным сгоранием, а третий цикл всегда это цикл после пропуска зажигания для бензина и для бензина с 0,02 кг/ч водорода или неполного сгорания для бензина с 0,03 кг/ч водорода.

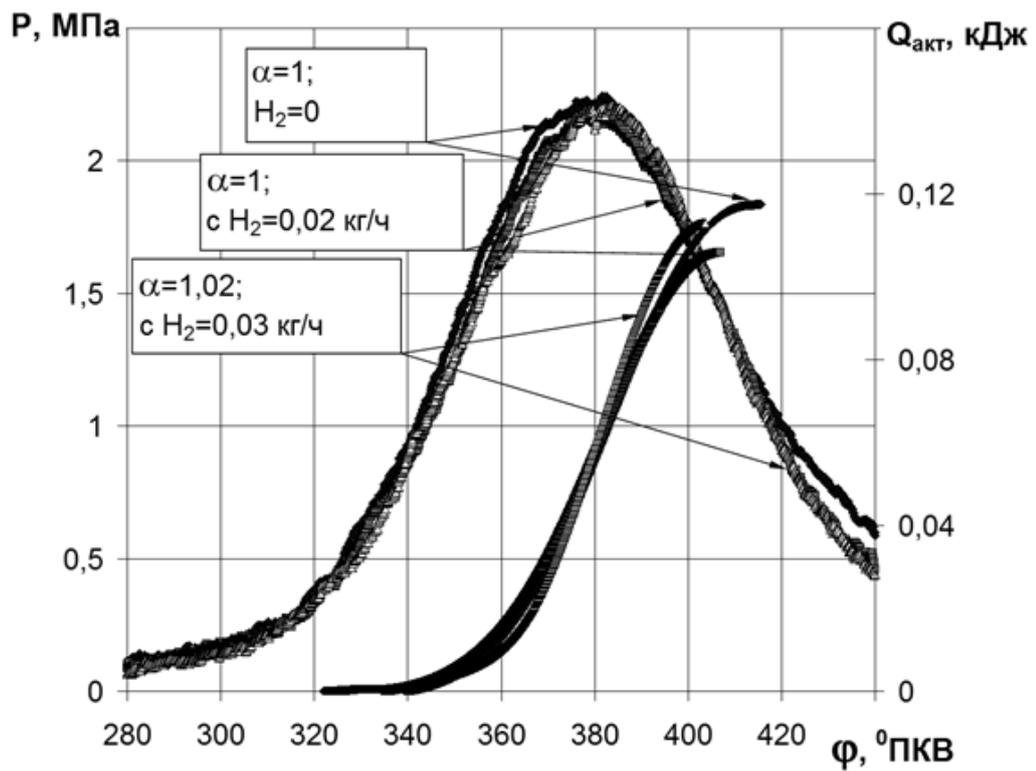


а)

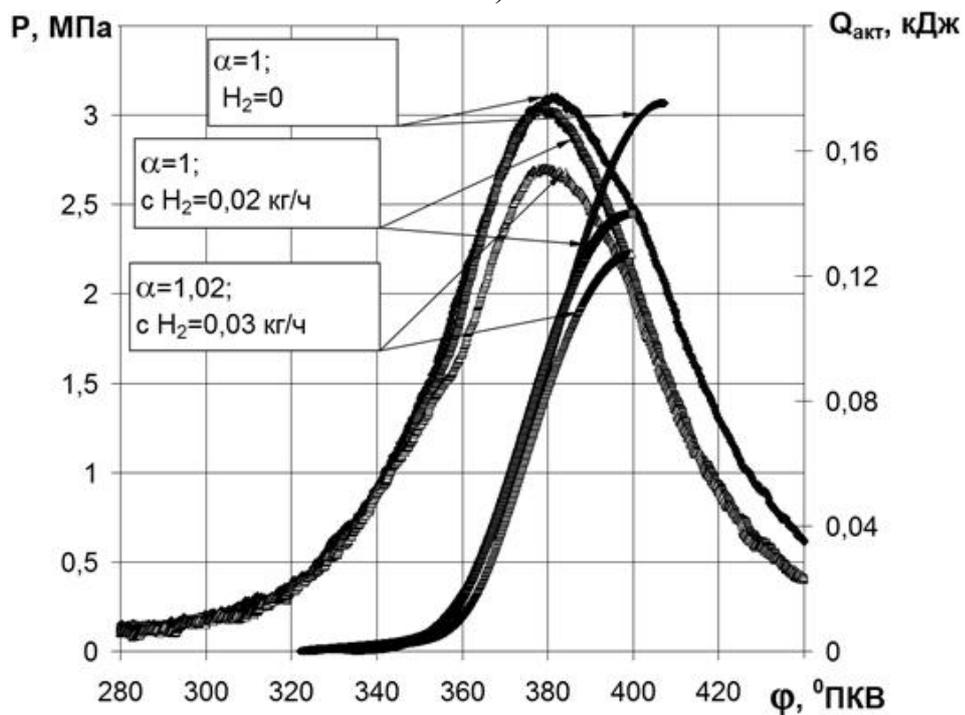


б)

Рисунок 4.6 – Индикаторное давление и количество активно выделившейся энергии в рассматриваемых циклах при коэффициенте избытка воздуха близким к $\alpha = 0,95$: а) в первом цикле, б) в третьем цикле

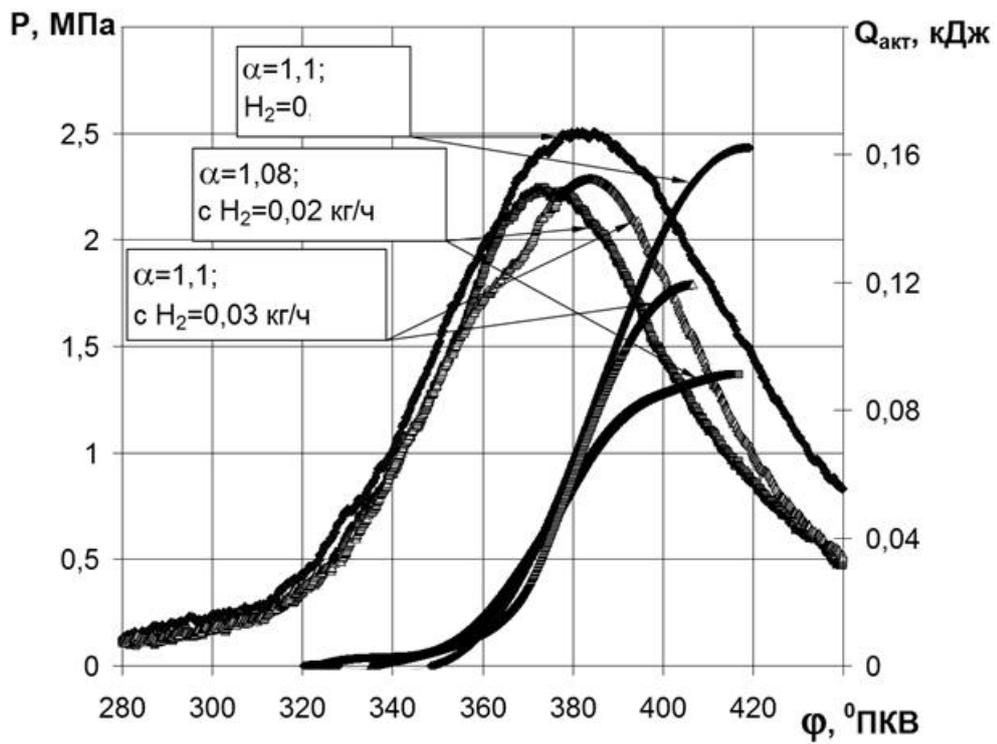


а)

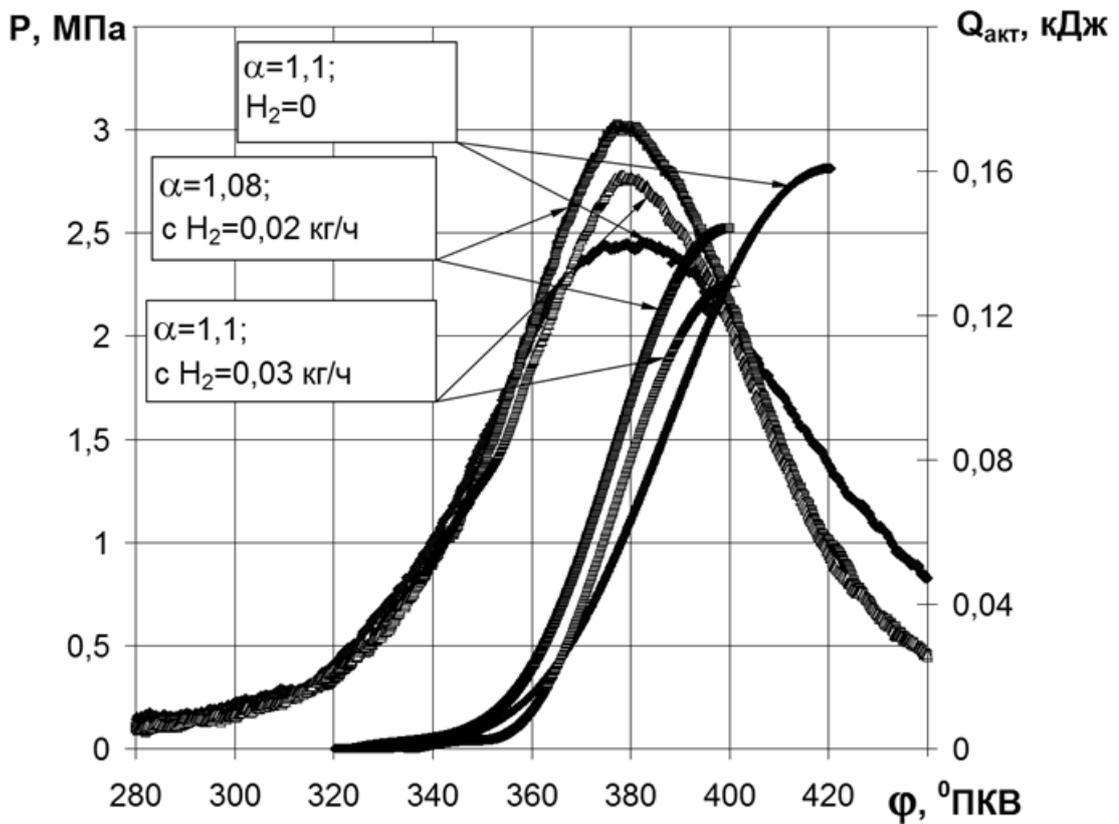


б)

Рисунок 4.7 – Индикаторное давление и количество активно выделившейся энергии в рассматриваемых циклах при коэффициенте избытка воздуха близким к $\alpha = 1$: а) в первом цикле, б) в третьем цикле



а)



б)

Рисунок 4.8 – Индикаторное давление и количество активно выделившейся энергии в рассматриваемых циклах при коэффициенте избытка воздуха близким к $\alpha = 1,1$: а) в первом цикле, б) в третьем цикле

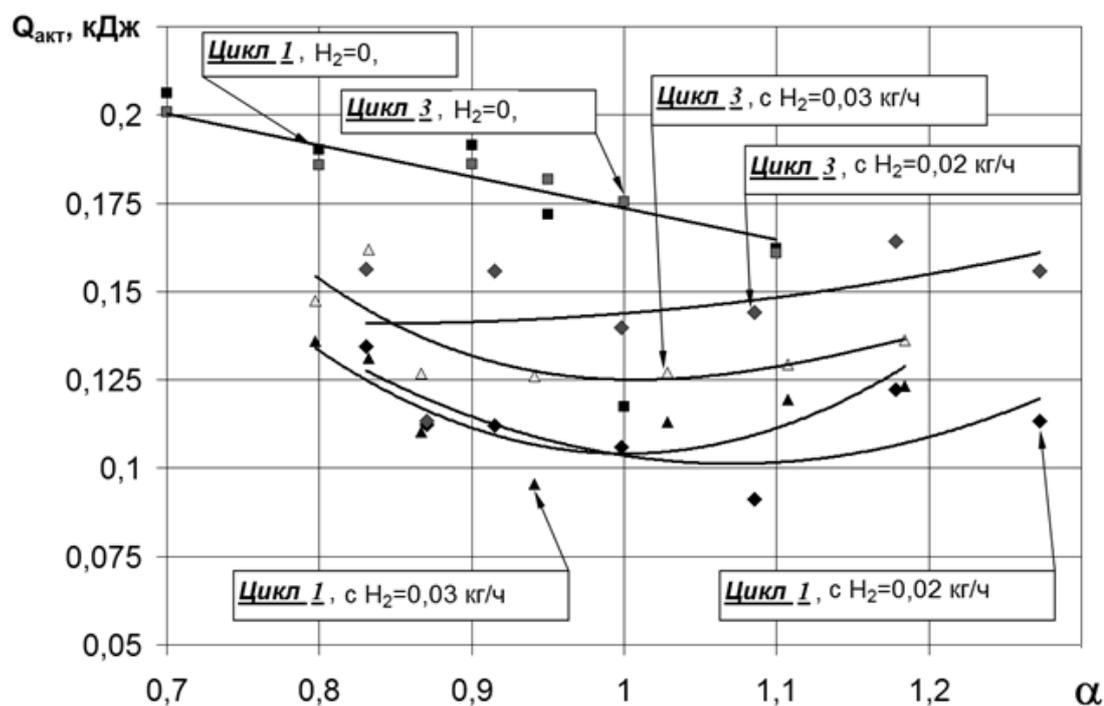


Рисунок 4.9 – Сравнение максимальных значений количества активно выделившейся теплоты в зависимости от коэффициента избытка воздуха и количества добавляемого водорода в бензовоздушную смесь

Поэтому приведем сравнение максимальных значений количества активно выделившейся теплоты в зависимости от коэффициента избытка воздуха и количества добавляемого водорода в бензовоздушную смесь (рисунок 4.9).

Анализируя полученные результаты и данные, приведенные на рисунке 4.9 можно выделить четыре зоны, характеризующиеся по качественному составу отработавших газов и эффективностью протекания процесса сгорания. Первая зона: в ней циклы с количеством активно выделившейся энергии менее 0,10 кДж, это циклы после полного сгорания, но за счет добавки водорода в них сформировалась зона горения, которая обеспечивает долю активно выделившейся энергии в размере 0,45 – 0,55 от энергии, введенной с топливом, а с учетом тепловых потерь в стенку это 75 – 85 % полноты окисления топлива. После них следует цикл также с неполным сгоранием до тех пор, пока не произойдет срыв с пропуском зажигания.

Вторая зона: в ней циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,10 до 0,12 кДж, это циклы в которых сформировался нормальный фронт пламени, обеспечивающий полное сгорание. Третья зона: это циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,125 до 0,165 кДж, в них обязательно предшествующий цикл имел пропуск зажигания или неполное сгорание, они характерны при работе на бензине с добавками водорода. Четвертая зона: это циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,16 до 0,21 кДж, это характерно для циклов после полного пропуска зажигания при работе на бензине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К основным результатам следует отнести следующие выводы по работе:

1. Добавка до 6% водорода от массы топлива имеет большое влияние не только на работу двигателя и токсичные ОГ, а также на пределы устойчивой работы при обеднении смеси. Было установлено, что увеличение количества добавляемого водорода повышает крутящий момент двигателя, мощность и КПД двигателя, на всех составах смеси начиная с $\alpha = 0,91$ и выше до предела эффективного обеднения смеси. При этом влияние водорода с обеднением смеси увеличивается.

2. При работе двигателя с 6% водорода обеспечивается предел эффективного обеднения смеси 1.3, где достигается повышения крутящего момента и мощности при снижении удельного расхода топлива примерно на 35%. Кроме того, двигатель работает плавно и контролируемо.

3. Использование водорода повышает границу обеднения смеси до $\alpha = 1,47$, в тоже время, для бензина она составляет $\alpha = 1.24$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Sher, E. Measurement and Predictions of the Performance and Emissions of a SX Engine Fueled Wkh Hydrogen-Enriched Gasoline [Текст] / E. Sher, Y. Hacoheh // Beer Sheva, Israel, 1988.
3. 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
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Das, L. M. Terfbrmance evaluation of a hydrogen-rueled 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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
14. 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.
15. Williamson, M. H. Wiring diagram of Injection Control Unit [Текст] / Private Communication, 2001.
16. 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.
17. Gurtner, D.M. Terformance 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.

18. 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
19. 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
20. 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
21. 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
22. 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)
23. 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
24. 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}
25. 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)
26. 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.
27. 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
28. 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>
29. 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)
30. 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)
31. 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)
32. 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](https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012016).

33. 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.
34. 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>
35. 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.
36. 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}
37. 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
38. 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.
39. 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.

40. 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.
41. 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.
42. Кульчицкий, А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие [Текст] / А.Р. Кульчицкий // Владимирский гос. университет. Владимир, 2000.
43. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени [Текст] / перевод с англ. Ю.Ф. Дитякина // Машиностроение. М. 1981.
44. Воинов, А.И, Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях [Текст] / А.И. Воинов // М.: Машиностроение. 1977.
45. 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.
46. Основы горения углеводородных топлив [Текст] / перевод с англ. под ред. Л.И. Хитрина и А.И. Попова // – Изд. иностр. литературы. – 1960
47. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. Изд.: Ч.1: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда // Металлургия, 1988.
48. Иссерлин, А.С. Основы сжигания газового топлива [Текст] / А.С. Иссерлин // Справ. Пособие. - Л.: 1987
49. Звонов, В.А., Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.А. Звонов // М.: Машиностроение, 1981.

50. Жегалин, О.И., Снижение токсичности автомобильных двигателей [Текст] / О.И. Жегалин, П.Д. Лукачев // - М.: Транспорт, 1985.
51. 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.
52. Степанов, Е.М., Ионизация в пламени и электрическое поле [Текст] / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков // М.: Metallургия, 1968.
53. Аравин, Г.С., Ионизация пламенных газов в условиях бомбы и двигателя [Текст] / Г.С. Аравин // Дис. ИХФ АН СССР, 1952.
54. 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
55. 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.
56. 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.
57. 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