

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

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Применение добавки водорода для снижения токсичности
отработавших газов ДВС на режимах глубокого дросселирования по
продуктам неполного сгорания

Студент

С.В. Лиманов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель
Консультанты

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.т.н., проф. А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2017 г.

Тольятти 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
ГЛАВА 1 Критический обзор известных источников по проблеме снижения токсичности по продуктам неполного сгорания	5
1.1 Механизм образования продуктов неполного сгорания в поршневых ДВС с искровым зажиганием.....	5
1.2 Методы снижения концентрации продуктов неполного сгорания в условиях ДВС с искровым зажиганием.....	12
1.3 Применение добавки водорода для снижения концентрации продуктов неполного сгорания в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием.....	14
1.4 Возможности получения и применения добавки водорода в углеводородное топливо для повышения эффективности процесса сгорания и снижения токсичности ОГ.....	17
1.5 Перевод иностранных источников по теме исследования.....	23
1.6 Заключение по первой главе постановки проблемы исследования	61
ГЛАВА 2 Оборудование, использованное в эксперименте.....	62
2.1 Описание одноцилиндрового двигателя УИТ-85.....	62
2.2 Описание двигателя ВАЗ с изменяемой степенью сжатия.....	65
2.3 Выводы по второй главе.....	66
ГЛАВА 3. Результаты экспериментов и их анализ.....	67
3.1 Результаты экспериментального исследования по выявлению влияния добавки водорода на СН и СО в отработавших газах.....	67
3.2 Влияние добавки водорода на концентрацию СН в ОГ.....	78
3.3 Влияние добавки водорода в на концентрацию угарного газа в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием.....	82
Основные результаты и выводы.....	86
Список использованных источников.....	87

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Для уменьшения вредного воздействия двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на окружающую среду необходимо постоянное совершенствование его конструкции, направленное на снижение эмиссии вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу с отработавшими газами (ОГ). Современные исследования в этой области в основном направлены на поиски способов эффективной работы двигателя на бедной топливно-воздушной смеси (ТВС), благодаря чему достигается снижение токсичности ОГ и повышается топливная экономичность двигателя. Однако при этом встречается ряд трудностей, в числе которых невозможность количественного прогнозирования эмиссии вредных веществ для определенного режима работы двигателя ввиду отсутствия в литературе соответствующих расчетных зависимостей и доступных по цене методов и алгоритмов определения токсичности транспортных ДВС.

Целью работы является снижение токсичности в ДВС с искровым зажиганием по продуктам неполного сгорания за счет применения водорода, как активатора горения, в том числе и на режимах глубокого дросселирования.

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

1. выявить особенности изменения концентрации продуктов неполного сгорания в ДВС с искровым зажиганием при добавке водорода в качестве активатора горения.
2. выявить возможности воздействия на рабочий процесс позволяющие снизить токсичность по продуктам неполного сгорания, в том числе и на режимах глубокого дросселирования.

Объект исследования: ДВС с искровым зажиганием.

Предмет исследования: образование продуктов неполного сгорания в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием.

Методы исследования. Применялись метод экспериментального анализа, включающий в себя стендовые испытания на одноцилиндровой исследовательской установке УИТ-85 и двигателе ВАЗ-2111, методы эмпирического анализа и статистическая обработка данных.

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

Научная новизна исследования

Определено влияние физико-химических свойств углеводородовоздушной топливной смеси на условия повышения экологичности работы двигателя по продуктам неполного сгорания.

Практическая значимость работы:

Результаты исследований особенностей влияния добавок водорода в бензовоздушную смесь на токсичность отработавших газов по продуктам неполного сгорания.

На защиту выносятся:

1. Экспериментальные данные, по влиянию добавки водорода на токсичность отработавших газов по продуктам неполного сгорания.
2. Закономерности изменений условий сгорания углеводородного топлива обеспечивающие снижение токсичности по продуктам неполного сгорания.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» ТГУ, а также на конференции, в 2016-17 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 печатных работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 37 наименований. Работа изложена на 91 страницах машинописного текста, 0 приложениями, иллюстрированного 2 таблицей и 27 рисунками, общий объем составляет 91 страницы.

ГЛАВА 1 Критический обзор известных источников по проблеме снижения токсичности по продуктам неполного сгорания

1.1 Механизм образования продуктов неполного сгорания в поршневых ДВС с искровым зажиганием

Сгорание в ДВС с искровым зажиганием характеризуется неравновесным составом горючего и окислителя. Так по соотношению горючего и окислителя принято разделять на три основные группы составов смеси:

- Первая группа это богатая смесь, она характеризуется недостатком кислорода в смеси, следовательно продукты неполного сгорания CO (оксид углерода или угарный газ) и C_nH_m (несгоревшие углеводороды) образуются в большем количестве в связи с нехваткой кислорода для полного окисления топлива, при этом чем более богатая смесь тем больше в ней продуктов не полного горения.
- Вторая группа это стехиометрическая смесь, в этой группе составов смеси характерно, что общее количество окислителя в цилиндре двигателя (воздуха) равно теоретически необходимому количеству для полного сгорания топлива, в таком составе смеси продукты неполного сгорания CO и C_nH_m образуются в зонах неравномерного распределения кислорода и топлива в камере сгорания и в зонах гашения пламени, или там где процесс сгорания по различным причинам затруднен.
- Третья группа это бедная смесь, которая характеризуется избытком свободного кислорода, как во фронте пламени так и в продуктах сгорания, соответственно продукты неполного сгорания CO и C_nH_m образуются в меньшем количестве, так как в объеме происходит полное сгорание, а выход CO и C_nH_m определяется условиями гашения пламени в близи стенок камеры сгорания или при снижении скорости сгорания до скорости пульсационной составляющей, приводящей к неполному сгоранию во фронте пламени, это явление возможно при

составах смеси с коэффициентом избытка воздуха значительно больше стехиометрического, где имеет место неполнота химической реакции связанная с уменьшение интенсивности процесса сгорания и неполным сгоранием во фронте пламени, т.к. при турбулентном горении моли ТВС могут проходить сквозь фронт пламени не сгорая полностью, вследствие чего наблюдаются значительные рост выбросов C_nH_m .

Рассмотрим более подробно механизмы образования несгоревших углеводородов, как основного токсичного компонента из продуктов неполного сгорания. Так на рисунке 1.1 представлена схема распределения зон образования СН в камере сгорания поршневого ДВС с искровым зажиганием.

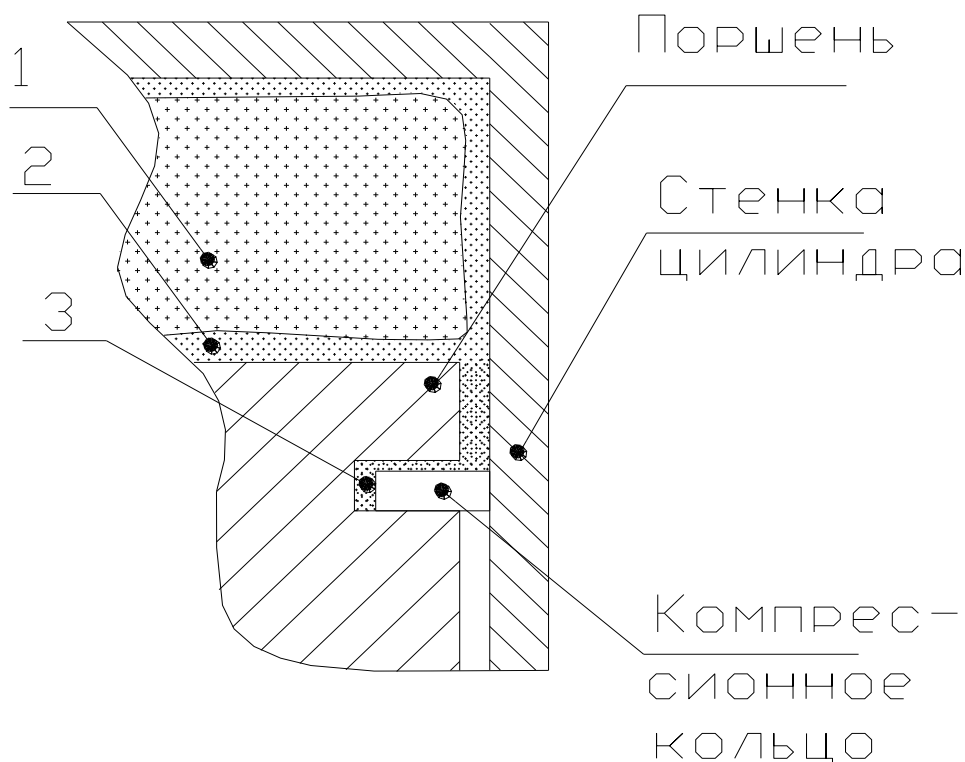


Рисунок 1.1 - Схема распределения зон образования СН в камере сгорания поршневого ДВС с искровым зажиганием

Как мы видим из рисунка 1.1 существует три основных механизма образования СН в процесс сгорания:

- Первый из них это механизм образования объемных несгоревших углеводородов. Этот механизм является основным при сгорании богатых, забалластированных и переобедненных смесей. В этом механизме несгоревшие углеводороды образуются в объеме во фронте пламени вследствие неполного окисления в процессе сгорания, при богатой смеси это возможно, так как не хватает кислорода для полного сгорания, в переобедненных смесях это возможно при неполном сгорании вследствие низкой скорости ламинарного горения, а в стехиометрических смесях это возможно при сильной забалластированности горючей смеси продуктами сгорания от прошлого цикла с различной реакционной способностью.
- Второй по значимости является механизм образования несгоревших углеводородов из замороженных или как их ещё называют пристеночных слоев. Этот механизм возможен вследствие того, что температура стенок камеры сгорания всегда ниже 400 - 500 градусов по Цельсию, т.к. температура рубашки охлаждения редко превышает 120 градусов Цельсия, тогда как согласно цепочно-тепловому механизму распространения процесса сгорания по гомогенной смеси, минимальная температура для продолжения и активации следующей цепи окисления должна быть не ниже 700 - 800 градусов Цельсия, следовательно у стенки камеры сгорания происходит значительное охлаждение пристеночного слоя топливно-воздушной смеси, за счет теплоотвода в стенку, что приводит к обрыву реакции окисления вблизи стенки, а оставшиеся в пристеночной области продукты неполного сгорания и в частности несгоревшие углеводороды на такте расширения и выпуска диффундируют в объем и выходят в качестве токсичных компонентов с продуктами сгорания в выхлопную систему.
- Третьим механизмом образования несгоревших углеводородов являются объемы гашения или зазоры. Это механизм описывающий условия гашения пламени в зазорах и щелях геометрический размер кото-

рых не позволяет распространяться пламени в них из-за большой теплоотдачи в стенки. Такими объектами в камере сгорания являются вытеснители, если в момент достижения их фронтом пламени зазор между вытеснителем и головкой цилиндра не превышает 5 мм, а также жаровый пояс, т.е. расстояние от днища поршня до первого компрессионного кольца. Следовательно оставшиеся в этих зонах углеводороды выходят с отработавшими газами, как это показано во втором механизме.

Обобщение выше сказанного проиллюстрировано на рисунке 1.2, где представлена схема распределения токсичных компонентов в зависимости от состава смеси для двигателя с искровым зажиганием.

Из рисунка 1.1 видно, что концентрация несгоревших углеводородов в отработавших газах снижается вплоть до состава смеси с коэффициентом избытка воздуха равным 1,1 - 1,2, и после 1,25 - 1,3 начинает увеличиваться. Разберем эту закономерность изменения концентрации СН подробнее. В зоне богатых смесей (коэффициент избытка воздуха от 0,5 до 0,98) снижение концентрации СН при увеличении коэффициента избытка воздуха происходит вследствие более полного сгорания топлива по первому механизму, а также снижения концентрации углеводородов в пристеночной зоне и зонах гашения. Снижение концентрации несгоревших углеводородов в зоне от стехиометрической до предела эффективного обеднения смеси, обуславливается снижением концентрации углеводородов в пристеночной области и в зонах гашения, а также частичным до окислением диффундирующих углеводородов в процессе расширения и выпуска горячими газами при наличии свободного кислорода. Повышение концентрации несгоревших углеводородов при переобеднении смеси говорит нам о появлении объемных углеводородов из-за низких скоростей горения, которые возникают вследствие низкой теплотворной способности бедной топливно-воздушной смеси, а следовательно и низких температур сгорания.

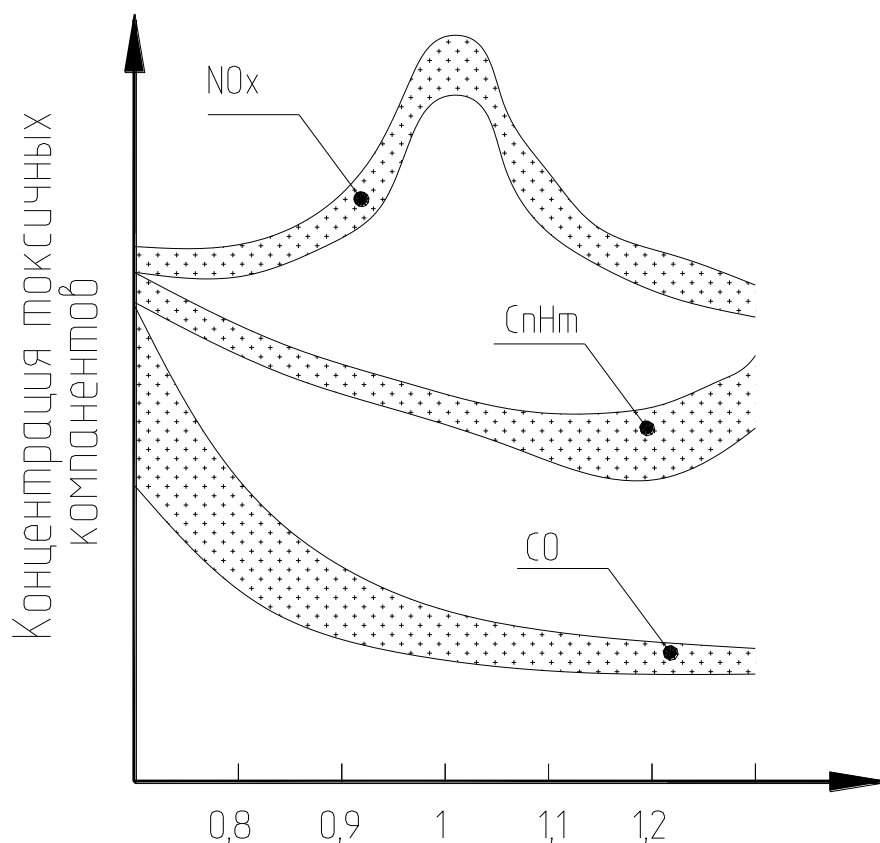


Рисунок 1.2 - Схема распределения токсичных компонентов в зависимости от состава смеси для двигателя с искровым зажиганием

Механизм образования угарного газа несколько схож с механизмом образования несгоревших углеводородов, так как оба они основаны на условиях неполного сгорания топлива. Только CO не образуются в объемах гашения, а образуются только в зонах обрыва цепей горения вследствие недостатка кислорода (зона богатых смесей) и вследствие угасания пламени у стенки цилиндра, этот механизм главный в зоне бедных и стехиометрических смесей, что проиллюстрировано на рисунке 1,2, где содержание угарного газа активно убывает с увеличением коэффициента избытка воздуха до зоны стехиометрического состава, а затем при дальнейшем обеднении уменьшается лишь незначительно, и это связано с уменьшением концентрации топлива в цилиндре, следовательно и в отработавших газах эта тенденция сохраняется.

В современных двигателях с нейтрализатор отработавших газов, где поддерживается состав смеси вблизи со стехиометрической концентрация продуктов неполного сгорания зависит от другого показателя характеризующего также состав смеси. Так в работах многочисленных авторов показано, что помимо влияния коэффициента избытка воздуха на концентрацию продуктов неполного сгорания в отработавших газах, также на неё значительно оказывает влияние и степень разбавленности горючей смеси остаточными газами, при том что химический состав их может значительно варьироваться от инертных углекислый газ, вода, азот и остатки кислорода, до активных продуктов неполного окисления, состоящих из радикалов, различных гидроксильных групп и продуктов неполного сгорания различной степени завершенности. При этом различают также три основных зоны в зависимости от количества и качества остаточных газов:

- Первая зона это мощностные режимы работы двигателя. В этой зоне остаточных газов минимальное количество и они не оказывают существенного влияния на процесс сгорания и образование токсичных компонентов.
- Вторая зона это режим средних нагрузок, в ней количество остаточных газов увеличивается и на нижних значениях может достигать 50%, но состав их в большей степени инертный и мало участвует в процессе сгорания, разве что снижает энергоёмкость смеси и следовательно температуру и скорость распространения пламени, тем самым обеспечивая условия для незначительного роста несгоревших углеводородов в основном за счет пристеночных замороженных слоев.
- Третья зона это режим низких нагрузок и холостого хода который принято называть режимами глубокого дросселирования, которые характеризуются значительным содержанием остаточных газов вплоть до значений 100 - 150% от массы свежей смеси. При этом как показано на рисунке 1.3 рабочие циклы имеют значительную неравномерность и состав остаточных газов может быть инертным в большей

своей части если прошло полное сгорания (цикл I), иметь некоторое количество неполных продуктов сгорания (цикл III) или быть химически активными за счет частичного термического разложения в цикле с пропуском сгорания (цикл II). Следовательно на данном режиме работы двигателя даже при составе смеси стехиометрическом возможна повышенная токсичность по продуктам неполного сгорания в следствии с высокой неравномерностью протекания процесса сгорания при сильно меняющемся составе смеси.

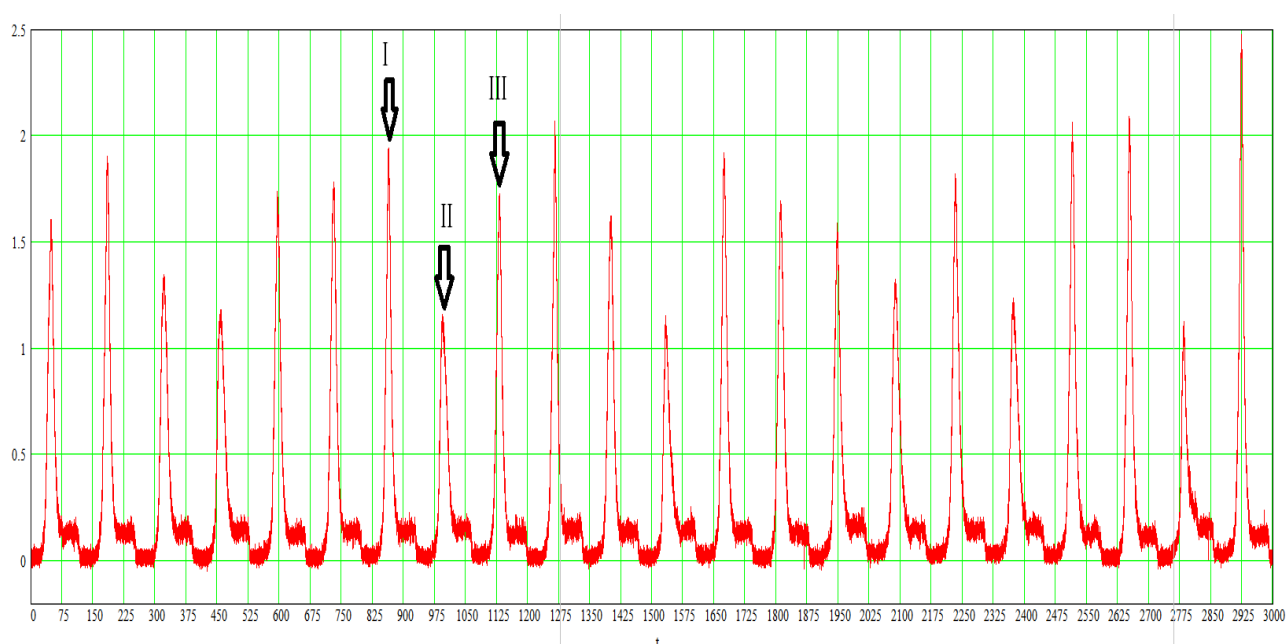


Рисунок 1.3 - Запись изменения давления в цилиндре двигателя при работе на бензине с $\alpha = 0,99$

Рассматривая подробно проблемы токсичности на режимах глубокого дросселирования приведем рисунок 1.4 где, отметим что на данном режиме имеются значительные флуктуации процесса сгорания которые выражаются в значительном разбросе характеристик топкичности по продуктам нполного сгорания. Так на рисунке 1.4 приведены токсические характеристики на режимах принудительного холостого хода трех двигателей ВАЗ. Заштрихованные области - зоны, определяющие разброс содержания компонентов отрабо-

тавших газов в зависимости от частоты вращения. Зависимости CO_2 и O_2 характеризуют полноту сгорания смеси.

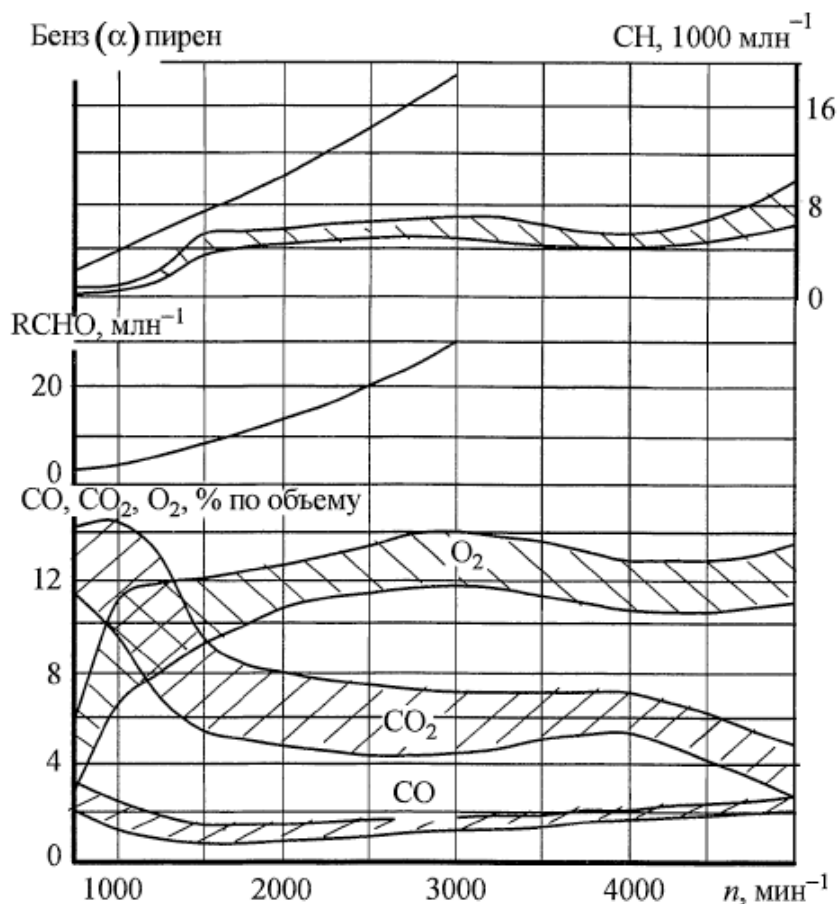


Рисунок 1.4 - Токсические характеристики двигателей ВАЗ на режимах принудительного холостого хода

1.2 Методы снижения концентрации продуктов неполного сгорания в условиях ДВС с искровым зажиганием

Для снижения концентрации продуктов неполного сгорания существуют несколько принципиально различающихся подходов.

Первый подход это изменение конструкции ДВС, а именно изменение условий впуска, формы камеры сгорания. т.е. условий обеспечивающих более быстрое сгорание при больших температурах, что обеспечивает снижение пристеночного слоя. Также к этой группе мероприятий относится улучшение смесеобразования и обеднение смеси, т.е. более точное дозирование подачи топлива (распределенный или непосредственный впрыск топлива)

при улучшении газодинамических процессов во впускном ресивере, и ещё легкие быстропрогреваемые впускные клапаны, уменьшение жарового пояса, повышение гомогенности смеси, повышение рабочей температуры системы охлаждения.

Второй подход это улучшение условий воспламенения топлива, а именно за счет улучшения эффективности искрового разряда, которые зависят от характеристик свечи зажигания и закона изменения подаваемого напряжения на свечу зажигания; за счет применения форкамерно-факельного зажигания или расслоения смеси в камере сгорания в основном за счет непосредственного впрыска топлива и т.д.

Третий подход связан с применением специальных присадок к топливу позволяющих изменить условия сгорания и воспламенения, что снижает токсичность по продуктам неполного сгорания, к таким относятся, добавку воды или водотопливных эмульсий, рециркуляцию отработавших газов, добавка специальных стабилизаторов горения повышающих октановое число и добавка закиси азота или водорода, что повышает скорость сгорания и следовательно полноту сгорания, что отражается на снижении концентрации продуктов неполного сгорания в отработавших газах.

Четвертый подход связан с переходом на другие виды топлива, это сжиженный нефтяной газ, сжатый природный газ, водород и т.д. Как правило газообразные топлива лучше перемешиваются с воздухом и более полно сгорают в цилиндре двигателя, что снижает токсичность по продуктам неполного сгорания.

Пятый подход связан с повышением качества очистки отработавших газов, а именно применением более совершенных каталитических нейтрализаторов, дожигателей и другим способом очистки отработавших газов. В настоящее время существует два типа очистки отработавших газов в ДВС с искровым зажиганием, а именно, для распределенного впрыска топлив а это применение трехкомпонентного каталитического нейтрализатора дожигającego СН и СО и восстанавливающего оксиды азота, но для его эффективной рабо-

ты требуется поддержание состава смеси близкого к стехиометрическому. Второй способ очистки это дожигатель продуктов неполного сгорания при накоплении и последующем восстановлении оксидов азота, он применяется в ДВС с непосредственным впрыском легкого топлива в цилиндр двигателя.

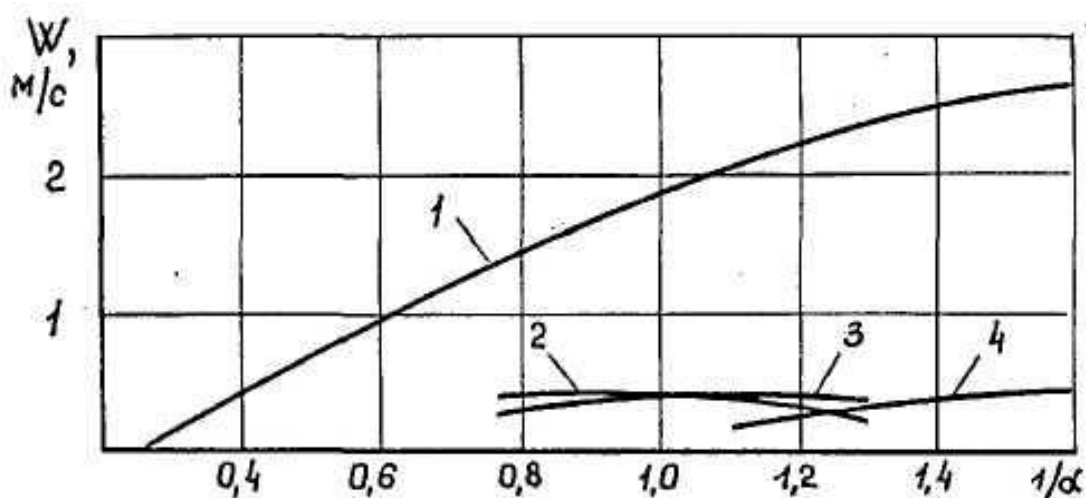
И шестой последний подход связан с применением специальных регулировок влияющих на рабочий цикл, к ним можно отнести отключение цилиндров, изменение частоты вращения коленчатого вала за счет применения большей вариативности передаточными отношениями коробки передач, изменением угла опережения зажигания и времени перекрытия клапанов, т.е. применением регулятора фаз ГРМ и т.д.

Представленные методы позволяют изменить физико-химический состав топливно-воздушной смеси, условия воспламенения и горения, что положительно сказывается на снижении токсичности отработавших газов по продуктам неполного сгорания.

1.3 Применение добавки водорода для снижения концентрации продуктов неполного сгорания в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием

Водород это молекула H_2 , которая является самой энергоемкой и химически активной при окислении углеводородных топлив из стабильных газообразных и жидких топлив. На рисунке 1.4 показано, что у водорода нормальная скорость сгорания в 3-4 раза выше чем у остальных углеводородных топлив, а это значит, что водород находясь в смеси с другим углеводородным топливом является драйвером процесса горения и разгоняет процесс сгорания, как это показано на рисунке 1.5, где видно, что добавка 3% водорода увеличивает скорость сгорания на 20 - 40% в зависимости от состава смеси. Также увеличение нормальной скорости распространения фронта пламени позволяет не допустить прорыв сквозь фронт пламени турбулентных молей при обеднении смеси, что существенно расширяет пределы эф-

фективного обеднения смеси и позволяет говорить о возможностях качественного регулирования мощности в бензиновых ДВС, и обеспечении при этом низкотоксичного рабочего цикла.



(1) - водород; (2) - изооктан; (3) - метан; (4) - окись углерода

Рисунок 1.4 – Ламинарная скорость сгорания топливовоздушных смесей различного состава

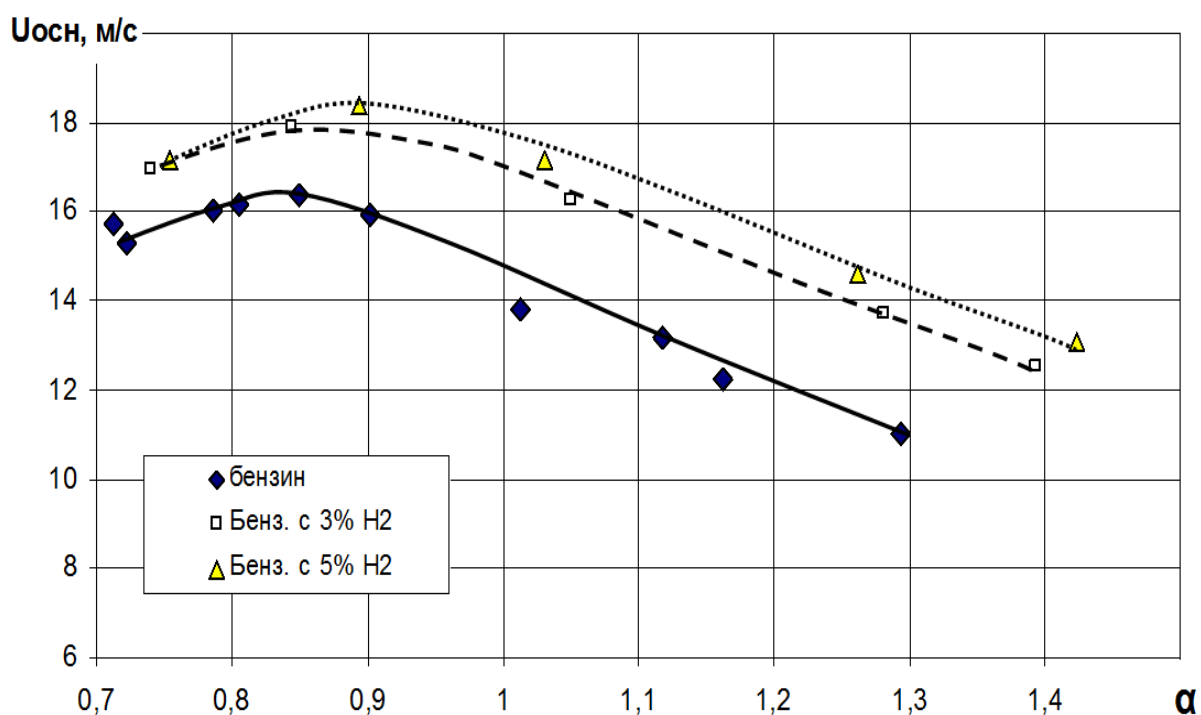
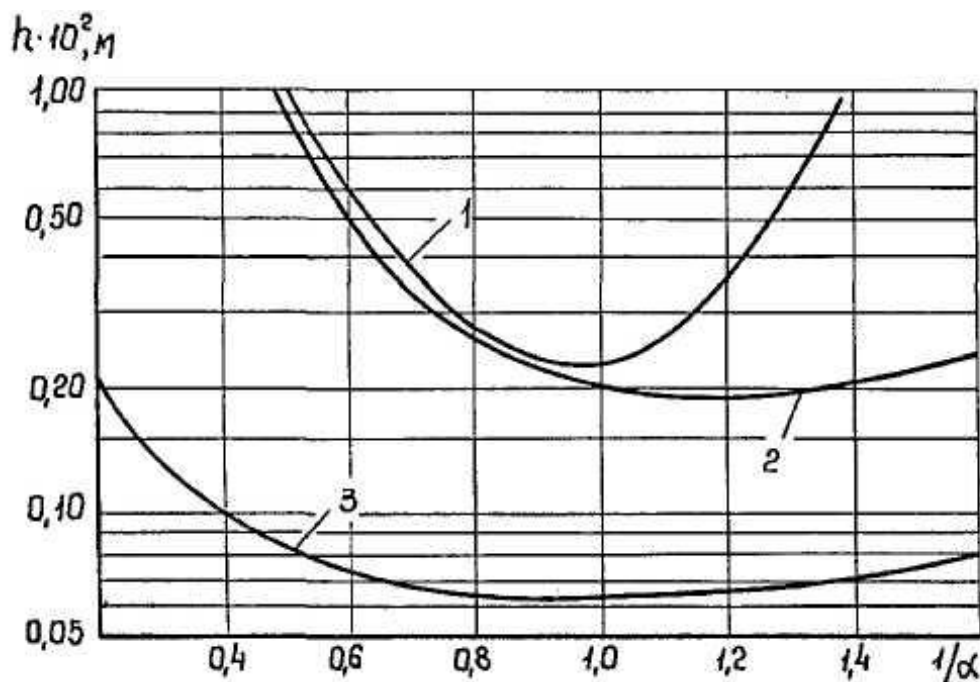


Рисунок 1.5 – Средняя скорость распространения фронта пламени в основной фазе сгорания при добавке водорода в бензовоздушную смесь в УИТ-85, $n=600$ об/мин, $UO3=16$, $\epsilon=5,9$.

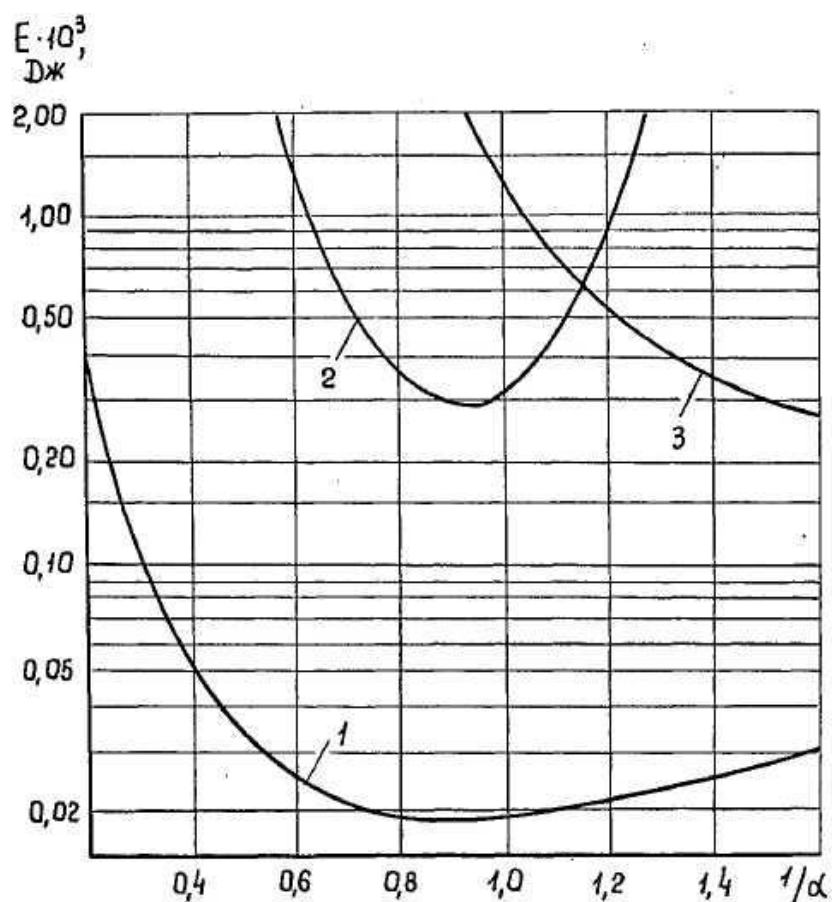
Помимо повышения скорости горения водород (рисунок 1.6) значительно снижает толщину зоны гашения в пристеночной области, в 3 - 4 раза, что существенно сказывается на снижении токсичности по несгоревшим углеводородам и угарному газу по механизму замороженных слоев, а также позволяет уменьшить до 3 мм минимальную толщину зажато объема в зонах вытеснителей, что позволяет более эффективно их использовать для ускорения процесса сгорания.

Также добавка водорода улучшает условия воспламенения и образования устойчивого очага распространения фронта пламени, за счет того что энергия активации водорода, как это показано на рисунке 1.7, в 20 раз ниже чем у других углеводородных газов и в 10 раз ниже чем у бензина, что очень важно при сгорании сильно забалластированных смесей на режимах глубокого дросселирования.



(1) - метан; (2) - пропан; (3) - водород

Рисунок 1.6 – Толщина зоны гашения пламени газообразных топлив



(1) - водород; (2) - метан; (3) - гептан

Рисунок 1.7 – Минимальная энергия воспламенения газообразных топлив

1.4 Возможности получения и применения добавки водорода в углеводородное топливо для повышения эффективности процесса сгорания и снижения токсичности ОГ

В ближайшие 12 лет машины, работающие на альтернативном виде топлива, вытеснят с рынка автомобили, оснащенные двигателем внутреннего сгорания, считает вице-президент концерна GM Алан Тауб.

По словам Тауба, технология водородных топливных ячеек значительно подешевела за последние несколько лет. При этом, в разработку новых бензиновых и дизельных моторов приходится вкладывать все больше денег для того, чтобы уменьшить выбросы. В ближайшие 12 лет может наступить момент, когда производство автомобилей, использующих топливные ячейки, станет дешевле производства машины с традиционным двигателем.

Также, необходимо отметить, что добавки водорода или водородсодержащего газа в двигатель без изменения режима его работы могут привести только к улучшению качества сгорания и, как следствие, к улучшению экологических показателей. Однако чем и ценен водород, так это возможностью перевода двигателя в более экономичные режимы: либо на обедненной смеси с коэффициентом избытка воздуха до 1,7, как у лучших дизельных двигателей, но без побочных явлений дизелей в виде больших выбросов сажи и NO_x , либо в режим с рециркуляцией части дымных газов.

Водородная энергетика сформировалась как одно из направлений развития научно-технического прогресса в середине 70-х годов прошлого столетия. По мере того, как расширялась область исследований, связанных с получением, хранением, транспортом и использованием водорода, становились все более очевидными экологические преимущества водородных технологий в различных областях народного хозяйства. Успехи в развитии ряда водородных технологий (таких как топливные элементы, транспортные системы на водороде, металлгидридные и многие другие) продемонстрировали, что использование водорода приводит к качественно новым показателям в работе систем или агрегатов. А выполненные технико-экономические исследования показали: несмотря на то, что водород является вторичным энергоносителем, то есть стоит дороже, чем природные топлива, его применение в ряде случаев экономически целесообразно уже сейчас. Поэтому работы по водородной энергетике во многих, особенно промышленно развитых странах относятся к приоритетным направлениям развития науки и техники и находят все большую финансовую поддержку со стороны как государственных структур, так и частного капитала.

Британская компания ITM Power разработала компактный и, что важно, недорогой (по уверениям фирмы) домашний электролизёр для заправки автомобилей водородом.

Прежде всего надо заметить, что проект ITM Power нацелен на исполь-

зование водорода как топлива для ДВС, что организовать проще и дешевле, чем перевод машин на силовые установки, использующие водородные топливные элементы.

Более того, как сказано в пресс-релизе, на ближайшие годы компания видит водород лишь в качестве дополнительного топлива, удобного и дешёвого решения, которое поможет значительно снизить выбросы парниковых газов и поспособствует смягчению изменения климата.

В полном соответствии с этой концепцией британцы путём небольших, как они пишут, переделок конвертировали в двухтопливный (водород/бензин) автомобиль Ford Focus. Причём, в отличие от на шумевшей двухтопливной "семёрки" BMW, где водород хранится в криогенном баке в виде жидкости, и от двухтопливной Mazda RX-8, которая питается газообразным водородом, хранящимся под давлением в 350 атмосфер, в экспериментальном Focus баллон содержит газообразный водород под давлением всего 75 атмосфер. Пусть количество водорода в машине — невелико, зато снижаются требования к прочности баллона, а значит — его стоимость. Домашний электролизёр от ITM Power потребляет от сети мощность в 10 киловатт. На предварительных испытаниях одна заправка от этого электролизёра позволила опытному авто проехать 40 километров на одном водороде, после чего двигатель перешёл на обычное, бензиновое питание. И автомобиль, и первые образцы электролизёров компания намерена официально представить публике позже, в этом году. О дате массового производства домашней заправки, точно ничего сказать нельзя, но британцы намерены уже в следующем году начать серийный выпуск целой линейки электролизёров для разных областей применения.

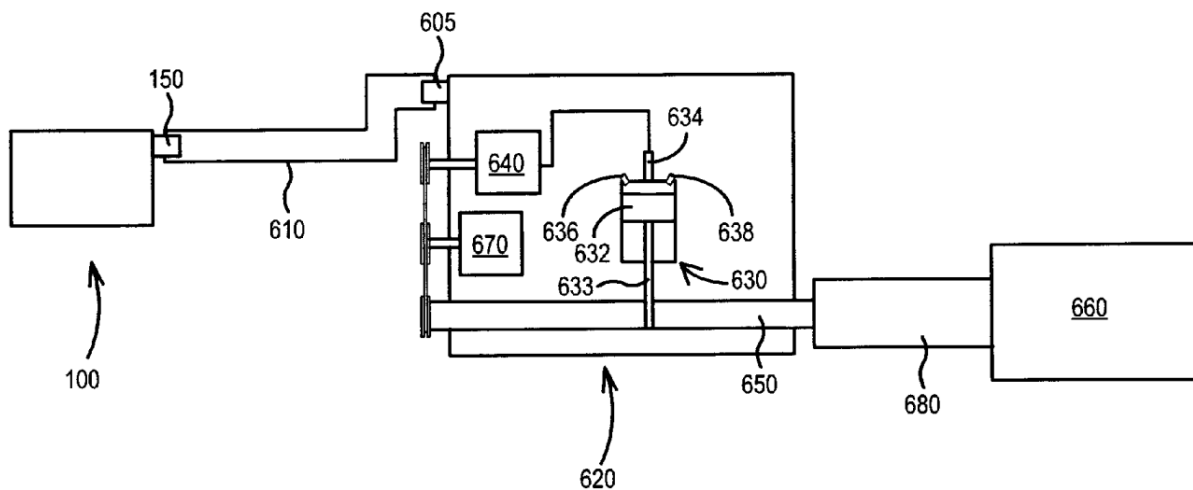


Рисунок 1.10 - Система электролитического преобразования воды в смесь водород/кислород на борту автомобиля

Китайская организация ZHONGSHAN CITY WEIBAO ELECTRON (рисунок 1.11) запатентовала специальную простую и технологичную геометрическую форму пластин электролизера, которая позволяет генерировать водород из воды с низким энергопотреблением при силе тока от 3 до 15 ампер в течение промежутка времени 1,5 сек.

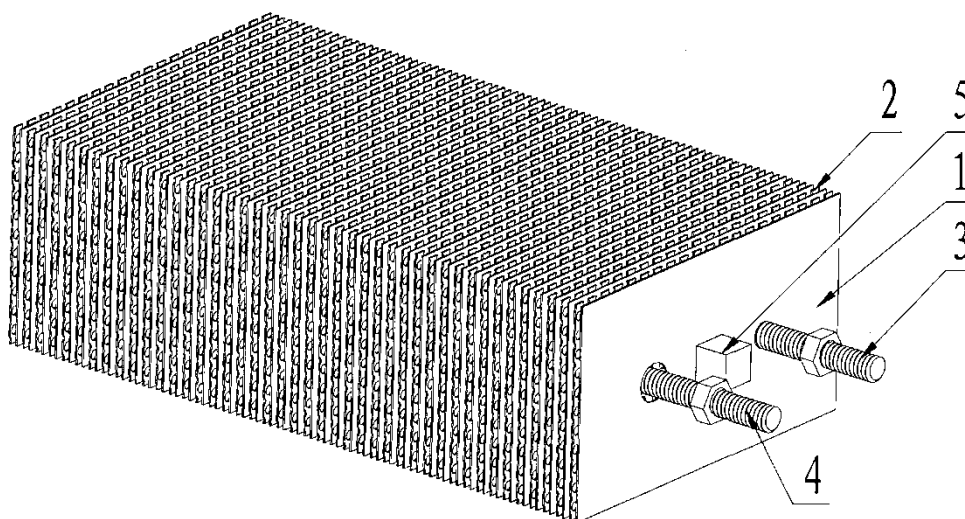


Рисунок 1.11 - Форма пластин электролизера, которая позволяет генерировать водород из воды с низким энергопотреблением

Компания Hy-Drive Technologies Ltd. запатентовала систему производства водорода для использования в ДВС с целью повышения эффективности работы и снижения вредных выбросов (рисунок 1.12). Система содержит источник электроэнергии, электролизную ячейку, трубки подвода водорода и кислорода к ДВС, а также средства мониторинга.

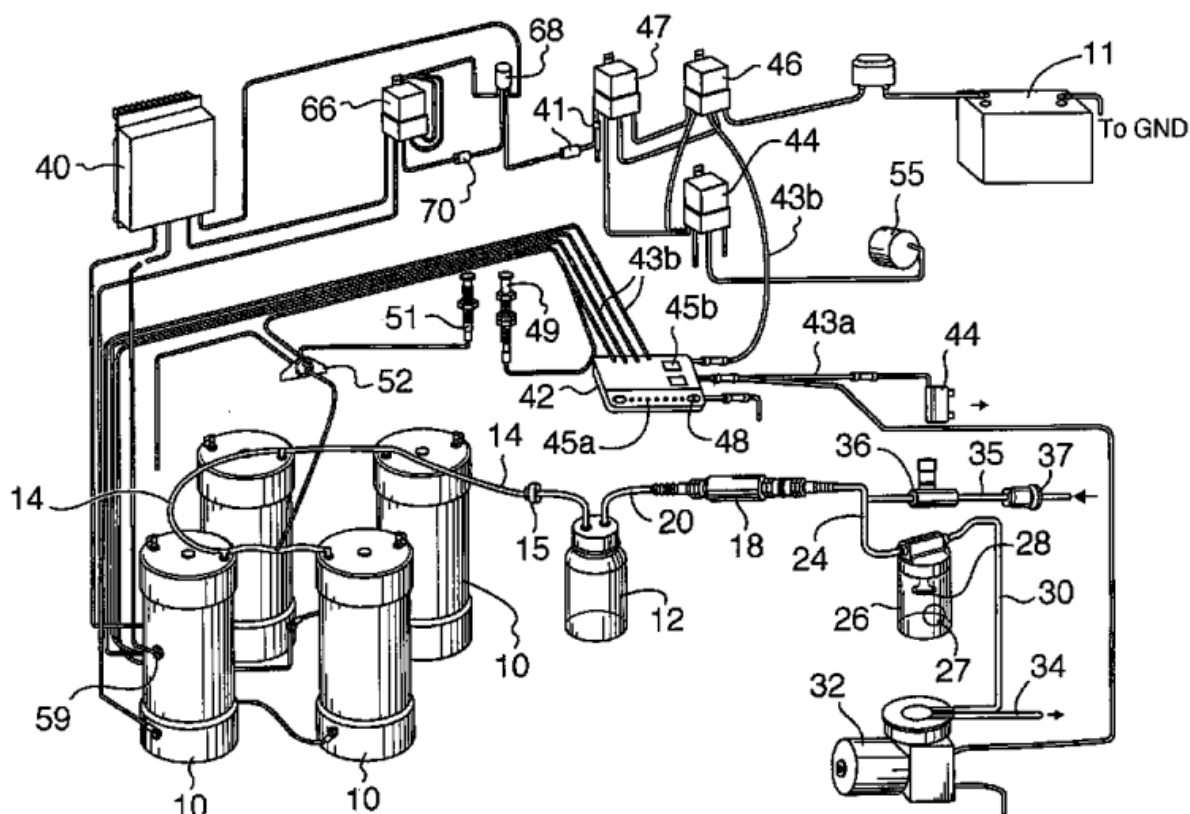


Рисунок 1.12 - Система производства водорода для использования в ДВС с целью снижения вредных выбросов

1.5 Перевод иностранных источников по теме исследования

Performance and Emission Comparison and Investigation of Alternative Fuels in SI Engines	Сравнение производительности и выбросов и исследование альтернативных видов топлива в двигателях СИ
INTRODUCTION	ВВЕДЕНИЕ
The strict regulation of environmental	Строгое регулирование природоохран-

<p>laws, the price of oil and its restricted resources, has made the engine manufacturers use other energy resources instead of oil and its products. Alternative fuels are derived from resources other than petroleum. The benefit of these fuels is that they emit less air pollutant compare to gasoline and most of them are more economically beneficial compared to oil and they are renewable [1-6]. Alternative fuels such as methane, propane, ethanol, methanol and hydrogen have been used since 1930 [1]. During the 1970s the price of crude petroleum rose rapidly. Its cost (in real terms) in 1970 and concern built up regarding the longer-term availability of petroleum. Pressures for substantial improvements in internal ombustion engine (ICE) efficiency (in all its many applications) have become very substantial indeed. Much work is being done on the use of alternative fuels instead of gasoline and diesel [1]. Of the non-petroleum- based fuels, natural gas, methanol and ethanol (methyl and ethyl alcohols) are receiving the greatest attention, while synthetic gasoline and diesel made from shale</p>	<p>ного законодательства, цены на нефть и ограниченные ресурсы заставили производителей двигателей использовать другие энергетические ресурсы вместо нефти и ее продуктов. Альтернативные виды топлива получены из ресурсов, отличных от нефти. Преимущество этих видов топлива заключается в том, что они выбрасывают меньше загрязнителей воздуха по сравнению с бензином, и большинство из них более экономически выгодны по сравнению с нефтью, и они являются возобновляемыми [1-6]. Альтернативные виды топлива, такие как метан, пропан, этанол, метанол и водород, использовались с 1930 года [1]. В течение 1970-х годов цены на сырую нефть быстро росли. Его стоимость (в реальном выражении) в 1970 году и возникли проблемы, связанные с более долгосрочной доступностью нефти. Давление на существенное улучшение эффективности внутреннего двигателя омбудсмента (ICE) (во всех его многочисленных приложениях) стало очень существенным. Проводится большая работа по использованию альтернативных видов топлива вместо бензина и дизельного топлива [1]. Из топлива, не содержащего нефти, на природный газ,</p>
---	---

oil or coal, and hydrogen could be longer-term possibilities [1]. The most common fuels that are used as alternative fuels are natural gas, propane, ethanol, methanol and hydrogen.

Methane, the main content of natural gas (up to 96 percent), is the most common alternative fuel and is one of the cleanest burning fuels [2]. It can be used in the form of compressed natural gas (CNG) or liquefied natural gas (LNG) to fuel vehicles. Dedicated natural gas vehicles are designed to run on natural gas only. Dual-fuel or bi-fuel vehicles are capable of operating on either gasoline or natural gas. That allows alternative fuel usage which is more economical without sacrificing vehicle range and mobility with wide-spread availability of gasoline or diesel [2].

Ethanol and methanol are alcohol-based fuels made by fermenting and distilling starch crops, such as corn. Both ethanol and methanol produce less emission than gasoline [3]. In Brazil, ethanol is well known as a clean, economic and available fuel for vehicles. But engines work on alcoholic fuels will experience a decre-

метанол и этанол (метил и этиловые спирты) получают наибольшее внимание, в то время как синтетический бензин и дизельное топливо, полученное из сланцевого масла или угля, и водород могут быть более долгосрочными [1]. Наиболее распространенными видами топлива, которые используются в качестве альтернативных видов топлива, являются природный газ, пропан, этанол, метанол и водород.

Метан, основное содержание природного газа (до 96 процентов), является наиболее распространенным альтернативным топливом и является одним из самых чистых видов горючего топлива [2]. Его можно использовать в виде сжатого природного газа (СПГ) или сжиженного природного газа (СПГ) для транспортных средств с топливом. Специальные транспортные средства для природного газа предназначены для работы только на природном газе. Двухтопливные или двухтопливные транспортные средства способны работать как на бензине, так и на природном газе. Это позволяет использовать альтернативное топливо, которое экономичнее, не жертвуя автомобильным диапазоном и мобильностью с широким распро-

ment in brake torque and power compared to gasoline [3].

Propane or liquefied petroleum gas (LPG) is a clean-burning fossil fuel that can be used to power ICEs. LPG-fueled vehicles produce fewer toxic and smog-forming air pollutants. LPG is usually less expensive than gasoline [4].

Hydrogen (H₂) is an attractive alternative energy carrier. Hydrogen is being widely explored as a fuel for passenger vehicles. It can be used in fuel cells to power electric motors or burned in ICEs. Hydrogen could make harmful emissions, global warming and the insecurity concerning oil supply a thing of the past since it produces no air pollutants or greenhouse gases when used in fuel cells and it produces only NO_x when burned in ICEs. [5, 6]

In this paper a full detailed comparison between some alternative fuels has been made. For approaching this aim, the experiment study is done in term of engine performance and exhaust emissions for gasoline, methane and methanol in a wide range of operating conditions. In order to examine

сравнением бензина или дизельного топлива [2].

Этанол и метанол являются спиртосодержащими топливами, полученными ферментацией и дистилляцией крахмальных культур, таких как кукуруза. Оба этанола и метанола дают меньше выбросов, чем бензин [3]. В Бразилии этанол хорошо известен как чистое, экономичное и доступное топливо для транспортных средств. Но двигатели, работающие на алкогольном топливе, будут испытывать снижение тормозного момента и мощности по сравнению с бензином [3].

Пропан или сжиженный нефтяной газ (Сжиженный нефтяной газ) - это ископаемое ископаемое топливо, которое может использоваться для питания ICE. Машины, работающие на сжиженном нефтяном газе, производят меньше токсичных и смогающих загрязнителей воздуха. LPG обычно дешевле бензина [4].

Водород (H₂) является привлекательным альтернативным носителем энергии. Водород широко изучается как топливо для пассажирских автомобилей. Он может использоваться в топливных элементах для питания электро-

other fuels performance and comparisons between them a thermodynamic model of an SI engine in Matlab environment is developed. Combustion of each one of these fuels differs from others so the code has been modified for each of them. For estimating the turbulent speed of flame, different methods have been used. The code has the ability to evaluate performance and emission characteristic of an engine such as brake power, brake torque, brake mean effective pressure, volumetric and thermodynamic efficiency, NO_x and CO concentrations.

ENGINE PERFORMANCE AND EMISSION

Type of fuel directly affects all performance and emission characteristics of an engine. In this work, the practical engine performance and emission parameters of interest are power, torque, brake mean effective pressure, brake specific fuel consumption, brake specific NO_x and produced CO. Power and torque depend on an engine's in-cylinder mixture conditions. Therefore volumetric efficiency plays one of the most important roles among the other engine parameters. In

двигателей или сжигания в ICE. Водород может сделать вредные выбросы, глобальное потепление и неуверенность в отношении поставок нефти в прошлом, поскольку в топливных элементах они не производят загрязняющих веществ или парниковых газов, и при сгорании в ЛДУ они генерируют только NO_x. [5, 6]

В этой статье сделано полное подробное сравнение некоторых альтернативных видов топлива. Для достижения этой цели экспериментальное исследование проводится с точки зрения производительности двигателя и выбросов выхлопных газов для бензина, метана и метанола в широком диапазоне рабочих условий. Для изучения других характеристик топлива и сравнений между ними разработана термодинамическая модель двигателя СИ в среде Matlab. Сжигание каждого из этих видов топлива отличается от других, поэтому код был изменен для каждого из них. Для оценки турбулентной скорости пламени использовались различные методы. Код имеет возможность оценивать характеристики производительности и излучения двигателя, такие как мощность тормоза, тормозной момент, эффективное

Fig.11, engine volumetric efficiency can be observed for the fuels that have been tested on engine. As known liquid fuels have latent heat of vaporization, as a result they produce a cooling effect on intake charge while vaporizing. Therefore, the density of intake mixture is increased and engine volumetric efficiency can rise. Gaseous fuels are vapor in ambient temperature so the cooling effect would not occur for them. On the other hand gaseous fuels have another effect on decreasing volumetric efficiency, this decrease is due to larger volume of fuel in inlet mixture. These are the main reasons of decrease in volumetric efficiency when engine is gaseous fueled.

As expected, it can be observed in Fig.11 that engine has the minimum volumetric efficiency when fueled with hydrogen and methane. The other fuels are liquid at ambient temperature. In this case the fuel which has the largest latent heat of vaporization will be more cooled than the others.

It can be seen that engine produce less power when operating on methane and hydrogen. As mentioned before,

тормозное давление, объемная и термодинамическая эффективность, концентрации NOx и CO.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ВЫБРОС ДВИГАТЕЛЯ

Тип топлива напрямую влияет на характеристики производительности и эмиссии двигателя. В этой работе важны практические характеристики двигателя и параметры эмиссии: мощность, крутящий момент, эффективное тормозное давление, удельный расход топлива на тормоз, удельный расход NOx и производимый CO.

Мощность и крутящий момент зависят от условий смеси в цилиндре двигателя. Поэтому объемная эффективность играет одну из самых важных функций среди других параметров двигателя. На рис. 11 можно наблюдать объемную эффективность двигателя для топлива, которое было проверено на двигателе. Поскольку известные жидкие топлива имеют скрытую теплоту испарения, в результате они создают охлаждающий эффект на впускной заряд при испарении. Поэтому плотность впускной смеси увеличивается, а объемная эффективность двигателя может повышаться. Газообразное топливо представляет собой

this is because of lower volumetric efficiency of methane and hydrogen fueled engine. In order to regain that lost power, two methods are used. Turbo-charging and raising the compression ratio under naturally aspirated operation. Engine maximum power for all of the fuels happens between 4500 and 5500 (rpm).

Engine power when operating on gasoline is higher than other fuels because the engine is designed for gasoline. All the other fuels have an octane number, higher than that of gasoline, so engine compression ratio could be higher if the engine was dedicated to those fuels, and therefore engine performance could be improved.

Fig.13 shows comparison of brake mean effective pressure (BMEP) of all fuels. For naturally aspirated spark ignition engines, maximum values are in the range 850 to 1050 (kPa) at the engine speed where maximum torque is obtained. At the speed where maximum power occurred, BMEP values are 10 to 15 percent lower. This fact has been mentioned by Heywood too [1].

пар при температуре окружающей среды, поэтому для них не будет охлаждающий эффект. С другой стороны, газообразное топливо оказывает еще меньшее влияние на снижение объемного КПД, это уменьшение связано с увеличением объема топлива во впускной смеси. Это основные причины снижения объемной эффективности при подаче газа на двигатель.

Как и ожидалось, на рис. 11 можно наблюдать, что двигатель имеет минимальный объемный КПД при использовании водорода и метана. Другие топлива являются жидкими при температуре окружающей среды. В этом случае топливо, которое имеет наибольшую скрытую теплоту испарения, будет более охлаждаться, чем другие.

Можно видеть, что двигатель потребляет меньше энергии при работе на метане и водороде. Как упоминалось ранее, это связано с меньшей объемной эффективностью двигателя с метаном и водородом. Для восстановления утраченной власти используются два метода. Турбо-зарядка и повышение степени сжатия при наддувом. Максимальная мощность двигателя для всех видов топлива колеблется между 4500 и 5500 (об / мин).

The reduction in BMEP with methane operation is seen through out the speed range. Part of this BMEP loss is due to longer ignition delay and lower flame speed of methane. As combustion starts earlier with respect to TDC, there is a greater amount of negative work done on the piston before TDC compared to gasoline. The remainder of the BMEP loss is due to the displacement of air by gaseous fuels.

Brake specific fuel consumptions (BSFC) for different fuels are compared in Fig.14. BSFC of methanol is the highest followed by ethanol. Because methanol and ethanol heating values are the lowest between the others and their stoichiometric air/fuel ratios are the smallest. That means for specific air/fuel equivalence.

There are two main reasons for this increase in temperature. Firstly, as noted, for gaseous fuels there is no cooling effect which will cause a higher initial temperature for in-cylinder charge. And secondly which is occurred for methane, is that more spark advance is needed because of the low flame speed of methane which rises peak of combustion tem-

Мощность двигателя при работе на бензине выше, чем у других видов топлива, потому что двигатель рассчитан на бензин. Все остальные топлива имеют октановое число, которое выше, чем у бензина, поэтому коэффициент сжатия двигателя может быть выше, если двигатель был предназначен для этих видов топлива, и, следовательно, производительность двигателя может быть улучшена.

На рисунке 13 показано сравнение эффективного давления тормозного усилия (BMEP) всех видов топлива. Для двигателей с наддувом с искровым зажиганием максимальные значения находятся в диапазоне от 850 до 1050 (кПа) при частоте вращения двигателя, где достигается максимальный крутящий момент. На скорости, при которой происходит максимальная мощность, значения BMEP на 10-15 процентов ниже. Этот факт был упомянут и Хейвудом [1].

Снижение BMEP с использованием метана видно из диапазона скоростей. Часть этой потери BMEP связана с более продолжительной задержкой зажигания и более низкой скоростью пламени метана. Поскольку сжигание начина-

perature and pressure.

In Fig.15 brake specific NO_x (BSNO_x) for each fuel is compared. According to measured and predicted data hydrogen and methane cause more BSNO_x. It must be remembered that NO_x formation take place at high temperatures and the increase of BSNO_x is caused by higher combustion temperature of hydrogen and methane.

Methanol and ethanol have the lowest heating value. Methanol flame speed is the highest after than that of hydrogen, consequently lower spark advance is used and combustion temperature is lowered. So BSNO_x produced by methanol is less than other fuels. It must be mentioned that hydrogen fueled engine is tested at stoichiometric mixture condition and the value of NO_x in that situation is dramatically high. It is clear that hydrogen can perform on much lower equivalence ratio which in that condition NO_x value would be really lower in comparison to stoichiometric condition.

In Fig.16, CO mass fraction is shown. CO concentration in exhaust mostly

ется раньше в отношении ВМТ, на поршне перед ВТМ наблюдается большая отрицательная работа по сравнению с бензином. Остальная часть потерь ВМЕР связана с перемещением воздуха газообразным топливом.

Сравнение удельного расхода топлива (BSFC) для разных видов топлива сравнивается на рис. 14. BSFC метанола является самым высоким, за которым следует этанол. Поскольку значения нагрева метанола и этанола являются самыми низкими между другими, а их стехиометрические соотношения воздух / топливо являются наименьшими. Это означает определенную эквивалентность воздуха / топлива.

Для этого повышения температуры есть две основные причины. Во-первых, как отмечалось, для газообразного топлива отсутствует охлаждающий эффект, который приведет к более высокой начальной температуре для заряда в цилиндре. А во-вторых, что происходит для метана, заключается в том, что требуется больше ускорения искры из-за низкой скорости пламени метана, которая поднимает пик температуры и давления горения.

На рис. 15 сравнивается удельный NO_x

depends on air/fuel ratio. A rich mixture causes more CO in exhaust gases [1, 9]. The closer to stoichiometric point the less amount of CO. Carbon to hydrogen ratio (C/H ratio) of fuel is another parameter which formation of CO is affected by [1]. In lean mixtures there is another additional source of CO caused by the flame interaction with the walls, the oil films and the deposits [9]. It is obvious that hydrogen produces no CO because there are no carbon atoms in hydrogen molecules but in fact as noted, there is a lubricant oil film on cylinder walls that interact with the flame and produces a little amount of CO even with hydrogen fueled engine.

(BSNO_x) для каждого топлива. Согласно измеренным и прогнозируемым данным, водород и метан вызывают большее количество BSNO_x. Следует помнить, что образование NO_x происходит при высоких температурах, а увеличение BSNO_x обусловлено более высокой температурой сгорания водорода и метана.

Метанол и этанол имеют наименьшую теплотворную способность. Скорость пламени метанола является самой высокой после водорода, следовательно, используется более низкий импульс искры, и температура горения снижается. Таким образом, BSNO_x, производимый метанолом, меньше, чем другие виды топлива. Следует отметить, что двигатель с водородным топливом тестируется в условиях стехиометрической смеси, и значение NO_x в этой ситуации резко возрастает. Понятно, что водород может работать на гораздо более низком эквивалентном соотношении, которое при этом условии значение NO_x будет действительно ниже по сравнению со стехиометрическим состоянием.

На фиг.16 показана массовая доля CO. Концентрация CO в выхлопе в основном зависит от соотношения воздух / топли-

	<p>во. Богатая смесь вызывает больше СО в выхлопных газах [1, 9]. Чем ближе к стехиометрической точке, тем меньше количество СО. Отношение углерода к водороду (отношение С / Н) топлива является другим параметром, на формирование СО которого влияет [1]. В обедненных смесях имеется еще один дополнительный источник СО, вызванный взаимодействием пламени со стенками, масляными пленками и отложениями [9]. Очевидно, что водород не производит СО, потому что в молекулах водорода отсутствуют атомы углерода, но на самом деле, как отмечено, на стенках цилиндра имеется пленка смазочного масла, которая взаимодействует с пламенем и производит небольшое количество СО даже при водородомоторном двигателе.</p>
<p>The effects of blending hydrogen with methane on engine operation, efficiency, and emissions</p>	<p>Влияние смешивания водорода с метаном на работу, эффективность и выбросы</p>
<p>ABSTRACT</p> <p>Hydrogen is considered one of the most promising future energy carriers and transportation fuels. Because of the lack of a hydrogen infrastructure and refueling stations, widespread introduction of vehicles powered by</p>	<p>Аннотация</p> <p>Водород считается одним из наиболее перспективных будущих энергоносителей и транспортных топлив. Из-за отсутствия водородной инфраструктуры и заправочных станций широкое распространение транспортных средств, рабо-</p>

pure hydrogen is not likely in the near future. Blending hydrogen with methane could be one solution. Such blends take advantage of the unique combustion properties of hydrogen and, at the same time, reduce the demand for pure hydrogen. In this paper, the authors analyze the combustion properties of hydrogen/methane blends (5% and 20% methane [by volume] in hydrogen equal to 30% and 65% methane [by mass] in hydrogen) and compare them to those of pure hydrogen as a reference. The study confirms that only minor adjustments in spark timing and injection duration are necessary for an engine calibrated and tuned for operation on pure hydrogen to run on hydrogen/methane blends.

INTRODUCTION

Several national and international organizations consider hydrogen to be the most promising future energy carrier and fuel for mobile applications. In the ideal long-term scenario, hydrogen will be used to power fuel cells that will convert chemical energy into electrical energy and then into mechanical energy by using electric

тающих на чистом водороде, вряд ли произойдет в ближайшем будущем. Смешивание водорода с метаном может быть одним из решений. Такие смеси используют уникальные свойства горения водорода и в то же время уменьшают потребность в чистом водороде. В настоящей работе авторы анализируют свойства горения смесей водорода / метана (5% и 20% метана [по объему] в водороде, равном 30% и 65% метана [по массе] в водороде) и сравнивают их с чисто чистыми. Водород в качестве эталона. Исследование подтверждает, что для калибровки и настройки двигателя для работы на чистом водороде требуются только незначительные корректировки времени искры и времени впрыска для работы на водородно-метановых смесях.

ВЕДЕНИЕ

Несколько национальных и международных организаций считают водород самым перспективным будущим энергоносителем и топливом для мобильных приложений. В идеальном долгосрочном сценарии водород будет использоваться для питания топливных элементов, которые преобразуют химическую энергию в электрическую, а затем в ме-

motors.

For this ideal scenario to become a reality, several hurdles have to be overcome, among them the lack of hydrogen infrastructure and appropriate onboard storage devices and the high cost of fuel cells. To begin the transition toward a hydrogen infrastructure and to address some of the issues related to hydrogen, some researchers have proposed using hydrogen to fuel internal combustion engines as a short- to mid-term solution. Several publications on hydrogen-powered engines and vehicles have been generated; U.S. and foreign manufacturers have been conducting ongoing research and development work in this area [1], [2].

Research organizations have also begun blending small amounts of hydrogen with other fuels to improve their combustion properties. The blends have included both liquid and gaseous fuels [3], [4].

This paper focuses on hydrogen/methane blends in a single-cylinder research engine. The combustion behavior, emissions, and performance of the engine fueled with

ханическую энергию с использованием электродвигателей.

Чтобы этот идеальный сценарий стал реальностью, необходимо преодолеть несколько препятствий, в том числе отсутствие водородной инфраструктуры и соответствующих бортовых устройств хранения данных и высокую стоимость топливных элементов. Чтобы начать переход к водородной инфраструктуре и решить некоторые проблемы, связанные с водородом, некоторые исследователи предложили использовать водород для сжигания двигателей внутреннего сгорания в качестве краткосрочного и среднесрочного решения. Было создано несколько публикаций о двигателях и транспортных средствах на водороде; США и зарубежные производители проводят текущие исследования и разработки в этой области [1], [2].

Исследовательские организации также начали смешивать небольшие количества водорода с другими видами топлива для улучшения их свойств горения. Смеси включали как жидкое, так и газообразное топливо [3], [4].

В данной работе основное внимание уделяется водородно-метанным смесям в одноцилиндровом исследовательском

blends of 5% and 20% methane in hydrogen are compared with engine operation on pure hydrogen (used as a baseline). The paper also identifies necessary changes in the engine control unit (ECU) to safely operate the engine on hydrogen/methane blends. The goal of this study is to provide data from the single- cylinder engine that can be used to convert a hydrogen vehicle to run on hydrogen/methane blends.

EMISSIONS BEHAVIOR

The only relevant emissions in hydrogen operation are NO_x emissions, which are highly dependent on the combustion temperature and, subsequently, on the air/fuel ratio. In pre-mixed operation with air/fuel ratios X higher than 2, the NO_x emissions are negligible. For richer mixtures, a distinct NO_x emissions peak can be observed at an air/fuel ratio of $X \sim 1.3$. A further reduction in air/fuel ratio toward stoichiometric operation results in a decrease in NO_x emissions [9]. As shown in Fig. 7, an increase in load results in an increase in NO_x emissions. Because of the lean- operating strategy, only a negligible

двигателе. Поведение горения, выбросы и производительность двигателя, работающего на смеси из 5% и 20% метана в водороде, сравниваются с работой двигателя на чистом водороде (используется в качестве базовой линии). В документе также указаны необходимые изменения в блоке управления двигателем (ECU), чтобы безопасно управлять двигателем на смеси водород / метан. Целью данного исследования является предоставление данных от одноцилиндрового двигателя, который может быть использован для преобразования водородного транспортного средства для использования в смеси водород / метан.

ПОВЕДЕНИЕ ЭМИССИИ

Единственными релевантными выбросами в водороде являются выбросы NO_x, которые сильно зависят от температуры горения и, следовательно, от отношения воздух / топливо. В смешанной работе с отношением воздух / топливо X выше 2 выбросы NO_x незначительны. Для более богатых смесей наблюдается заметный пик выбросов NO_x при соотношении воздух / топливо $X \sim 1,3$. Дальнейшее снижение соотношения воздух / топливо в сторону стехиометрической работы приводит к

amount of NO_x emissions occurs at an engine load of 2 bar IMEP. At a medium engine load (4 bar IMEP), the NO_x emissions are generally still below 10 ppm. Only operating points with extremely early spark timing (resulting in high combustion temperatures) produce NO_x emissions up to 100 ppm. At a higher engine load (6 bar IMEP), the NO_x emissions increase significantly (note the logarithmic scale). The same trend - with an increase in NO_x emissions for early spark timing - can be seen. Because of the faster combustion (and thus higher combustion temperatures) of pure hydrogen compared with the blends, in particular at high engine loads, the NO_x emissions are higher for pure hydrogen operation.

Hydrogen emissions are not regulated by any standards, but it is nevertheless important to monitor and minimize these emissions because they directly affect engine efficiency. Fig. 8 shows the hydrogen emissions associated with pure hydrogen operation and operation using the two hydrogen/methane blends. Very lean engine operation (IMEP of ~2 bar) results in

уменьшению выбросов NO_x [9].

Как показано на рис. 7, увеличение нагрузки приводит к увеличению выбросов NO_x. Из-за стратегии бережливого производства только незначительное количество выбросов NO_x происходит при нагрузке двигателя 2 бара IMEP. При средней нагрузке двигателя (4 бар IMEP) выбросы NO_x обычно остаются ниже 10 ppm. Только рабочие точки с чрезвычайно ранним временем искрообразования (что приводит к высоким температурам горения) вызывают выбросы NO_x до 100 ppm. При более высокой нагрузке на двигатель (6 бар IMEP) выбросы NO_x значительно увеличиваются (обратите внимание на логарифмическую шкалу). Та же тенденция - с увеличением выбросов NO_x для раннего искрового времени - может быть замечена. Из-за более быстрого сгорания (и, следовательно, более высоких температур горения) чистого водорода по сравнению с смесями, в частности при высоких нагрузках на двигатель, выбросы NO_x выше для работы с чистым водородом.

Выбросы водорода не регулируются никакими стандартами, но тем не менее важно контролировать и минимизиро-

a very slow combustion rate and, thus, a higher portion of unburned fuel. This trend can be seen for all three fuels. Because of the even lower combustion speed with an increased amount of methane in the blend, this effect is even more significant. With increased engine load, the hydrogen emissions drop well below 2,000 ppm. Considering that up to 30% (by volume) of the initial fuel gas mixture is hydrogen, 2,000 ppm (0.2% by volume) is minimal and represents an almost negligible loss in efficiency [10].

The second component of the blended fuels, methane, was also monitored during engine operation. The trends for methane emissions are very similar to those for hydrogen emissions. Because the fuels contain different amounts of (or no) methane, the absolute levels of the methane emissions differ significantly (see Fig. 9). As expected, methane emissions during pure hydrogen operation are close to zero.

iven that the engine is fueled with a homogenous mixture of hydrogen, methane, and air, we would expect

вать эти выбросы, поскольку они непосредственно влияют на эффективность двигателя. Инжир. На фиг.8 показаны выбросы водорода, связанные с работой и работой чистого водорода с использованием двух смесей водорода / метана. Очень быстрая работа двигателя (ИМЕР ~ 2 бар) приводит к очень медленной скорости горения и, следовательно, к более высокой части несгоревшего топлива. Эта тенденция наблюдается для всех трех видов топлива. Из-за еще более низкой скорости горения с увеличенным количеством метана в смеси этот эффект еще более значителен. При увеличенной нагрузке на двигатель выбросы водорода значительно ниже 2000 ppm. Учитывая, что до 30% (по объему) исходной топливной газовой смеси составляет водород, 2000 ppm (0,2 об.%) является минимальным и представляет собой почти незначительную потерю эффективности [10].

Второй компонент смешанного топлива, метан, также контролировался во время работы двигателя. Тенденции в отношении выбросов метана очень похожи на тенденции выбросов водорода. Поскольку топливо содержит различное количество метана (или нет), абсолют-

that the ratio of unburned fuel (methane and hydrogen) should be the same as the hydrogen/methane ratio of the feed fuel. Fig. 10 shows the ratio of methane to hydrogen emissions for the two different blends.

For the 5% methane mixture, the ratio of methane to hydrogen emissions is fairly constant, with an average of about 8% and a maximum of 11%. On the other hand, the methane-to-hydrogen emissions ratio for the 20% methane blend varies quite significantly, with a minimum ratio of over 30% and a maximum of nearly 55%. The average ratio of methane to hydrogen emissions for the 20% blend is almost 40%. In addition, the ratio increases with retarded spark timing - an effect that can also be seen for the low load traces of the 5% methane blend. This finding indicates that, toward the end of the combustion process in areas near the combustion chamber walls, hydrogen is still able to burn, while the local conditions do not allow methane to burn anymore. This effect is very likely caused by the shorter quenching distance of hydrogen (0.6 mm^*) compared with that

ные уровни выбросов метана значительно различаются (см. Рис. 9). Как и ожидалось, выбросы метана при работе с чистым водородом близки к нулю.

При условии, что двигатель подпитывается гомогенной смесью водорода, метана и воздуха, мы ожидаем, что отношение несгоревшего топлива (метана и водорода) должно быть таким же, как отношение водород / метан исходного топлива. Инжир. На фиг.10 показано соотношение выбросов метана и водорода для двух разных смесей.

Для смеси 5% метана отношение выбросов метана к водороду довольно постоянное, в среднем около 8% и максимум 11%. С другой стороны, отношение выбросов метана к водороду для 20% смеси метана значительно варьируется, при этом минимальное отношение составляет более 30% и максимум около 55%. Среднее соотношение выбросов метана и водорода для 20% -ной смеси составляет почти 40%. Кроме того, отношение увеличивается с задержкой искрового искрообразования - эффект, который также можно наблюдать для следов низкой нагрузки смеси 5% метана. Это открытие показывает, что к концу процесса горения в районах вблизи сте-

of methane (2 mm*) [8].

INFLUENCE OF BLENDING HYDROGEN AND METHANE ON ENGINE CALIBRATION

The main goal of our investigation was to determine the necessary changes and adaptations in the engine control unit (ECU) of a hydrogen-powered vehicle in order to operate it on blends of hydrogen and methane. Currently, the truck is operated with a lean-burn strategy with a constant air/fuel ratio and thus avoids NO_x-critical operating regimes. The vehicle uses a belt-driven supercharger to compensate for the loss in power output associated with hydrogen port injection operation. Further information on the truck and the operating strategy can be found in Reference [11].

INJECTION

In order to avoid operating regimes with high NO_x emissions, the truck is run on a lean-burn strategy with a constant relative air/fuel ratio X . The calibration of the ECU was performed for a relative air/fuel ratio of $X \sim 2.25$. Because of the changes in energy flow, adjustments in injection timing will be necessary. If only discrete

нок камеры сгорания водород все еще способен гореть, в то время как местные условия больше не позволяют сжигать метан. Этот эффект очень вероятно вызван более коротким расстоянием гашения водорода (0,6 мм *) по сравнению с метаном (2 мм *) [8].

НЕФТЬ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА И МЕТАНА НА КАЛИБРОВКУ ДВИГАТЕЛЯ

Основная цель нашего исследования состояла в том, чтобы определить необходимые изменения и адаптации в блоке управления двигателем (ЭБУ) транспортного средства с водородным двигателем для его работы на смеси водорода и метана. В настоящее время грузовик эксплуатируется со стратегией бережливого ожога с постоянным соотношением воздух / топливо и, таким образом, избегает критических режимов работы NO_x. Транспортное средство использует нагнетатель с ременным приводом, чтобы компенсировать потерю мощности, связанную с вводом в эксплуатацию водородного порта. Более подробную информацию о грузовике и о стратегии работы можно найти в [11].

ВПРЫСК

Чтобы избежать режимов работы с вы-

blends with known compositions are being used, the injection settings can be changed manually according to the dependencies shown in Fig. 6. If various blends or blends with unknown compositions are used to fuel the vehicle, the above-mentioned curve should be implemented in the ECU and a means to identify the composition of the mixture should be developed.

IGNITION

Because of the lower combustion speed of methane compared with that of hydrogen, the spark timing has to be adjusted for optimum engine performance. With the current engine control strategy, the engine is being run with a constant air/fuel ratio of $X \sim 2.25$. In this air/fuel ratio range, the MBT spark timing with the 5% methane-in-hydrogen blend is about 5 degCA - earlier than with pure hydrogen. For the 20% methane-in-hydrogen blend, the spark timing should be about 15 to 20 degCA - again, earlier than with pure hydrogen. For blends with small amounts of methane (<5% by volume), the engine can be operated without adjusting the

соким уровнем выбросов NOx, грузовик работает по стратегии бережливого ожога с постоянным относительным соотношением воздух / топливо X. Калибровка ЭБУ была выполнена для относительного соотношения воздух / топливо $X \sim 2,25$. Из-за изменений в потоке энергии потребуются корректировки времени впрыска. Если используются только дискретные смеси с известными композициями, настройки впрыска могут быть изменены вручную в зависимости от зависимостей, показанных на рис. 6. Если для горения транспортного средства используются различные смеси или смеси с неизвестными составами, вышеупомянутая кривая должна быть реализована в ЭБУ и должно быть разработано средство для определения состава смеси.

ЗАЖИГАНИЕ

Из-за более низкой скорости сгорания метана по сравнению с водородом, необходимо исправить синхронизацию зажигания для оптимальной работы двигателя. При текущей стратегии управления двигателем двигатель работает с постоянным соотношением воздух / топливо от $X \sim 2.25$. В этом соотношении воздух / топливо время сраба-

spark timing, which will result in only a negligible loss in engine efficiency. For blends with greater amounts of methane, the spark timing should be adjusted to maintain efficiency.

OTHER ECU FUNCTIONS

Although the advanced spark timing that is required when blending hydrogen with methane could lead to knocking, this seem unlikely - both because of the good knocking properties of methane and because the lean-burn strategy itself also inhibits knocking. Moreover, a knock sensor could be used to prevent engine knocking.

Because of the changed composition of the feed fuel, the dependence of the air/fuel ratio on the exhaust oxygen feedback changes slightly. Fig. 11 shows the dependence of exhaust oxygen content and relative air/fuel ratio in the relevant air/fuel ratio regime $1.8 < X < 2.6$. As the figure shows, the feedback of exhaust oxygen content (e.g., ~10% by volume) is equal to an air/fuel ratio X of 2.1 in pure hydrogen operation. The same oxygen content results in a relative air/fuel ratio

тывания МБТ с 5% -ной смесью метана в водороде составляет около 5 град. Грамм - раньше, чем с чистым водородом. Для 20% смеси метана в водороде время искрообразования должно быть примерно от 15 до 20 град. С - снова, раньше, чем с чистым водородом. Для смесей с небольшим количеством метана (<5 об.%) Двигатель можно эксплуатировать без регулировки искрового времени, что приведет к незначительной потере эффективности двигателя. Для смесей с большим количеством метана время искрообразования должно быть отрегулировано для поддержания эффективности.

ДРУГИЕ ФУНКЦИИ ЭСУД

Хотя предварительное искровое время, которое требуется при смешивании водорода с метаном, может привести к стуклению, это кажется маловероятным - как из-за хороших детонационных свойств метана, так и из-за того, что стратегия бережливого ожога также препятствует стучать. Кроме того, датчик детонации может использоваться для предотвращения стука двигателя.

Из-за измененного состава подаваемого топлива зависимость соотношения воздух / топливо от обратной связи от вы-

of 2.08 with the 5% blend and about 2.05 with the 20% blend.

Knowing that the air/fuel ratio, especially in the region of $X \sim 2$, has a crucial influence on NO_x emissions behavior, the effect described above should be taken into account. On the other hand, Fig. 7 shows that blending hydrogen with methane slightly reduces NO_x emissions because of the slower combustion speed of methane compared with that of hydrogen.

CONCLUSION

In order to investigate the effects of blending hydrogen with methane on engine performance, we conducted several tests on a single-cylinder research engine. The goal of these tests was to identify the changes to the engine ECU that are necessary to run the engine on hydrogen/methane blends.

On the basis of our results, we can draw the following conclusions.

Because of the lower combustion speed of methane compared with hydrogen, the spark timing must be advanced with increased amounts of methane in the blend.

The different properties of methane and hydrogen necessitate adjustment

хлопных газов изменяется незначительно.

Зависимость содержания отработанного кислорода и относительного соотношения воздух / топливо в соответствующем режиме соотношения воздух / топливо $1,8 < X < 2,6$. Как видно из рисунка, обратная связь по содержанию отработанного кислорода (например, ~ 10 об.%) равна соотношению воздух / топливо $X \sim 2,1$ в режиме чистого водорода. Такое же содержание кислорода приводит к относительному соотношению воздух / топливо 2,08 с 5% -ной смесью и около 2,05 с 20% -ной смесью.

Зная, что соотношение воздух / топливо, особенно в области $X \sim 2$, оказывает решающее влияние на поведение выбросов NO_x, следует учитывать эффект, описанный выше. С другой стороны, на рис. 7 показано, что смешивание водорода с метаном незначительно снижает выбросы NO_x из-за более медленной скорости сгорания метана по сравнению с водородом.

ВЫВОД

Чтобы исследовать влияние смешивания водорода с метаном на характеристики двигателя, мы провели несколько испытаний на одноцилиндровом исследу-

of the injection duration in order to achieve the same engine load (Fig. 6) presents a curve showing the necessary adjustments).

The NO_x emissions behavior of pure hydrogen compared with hydrogen/methane blends shows the same trends. Because of methane's slower combustion speed, the absolute level of emissions is slightly lower with an increased amount of methane.

The amount of unburned methane compared with hydrogen in the exhaust is higher relative to the composition of the feed fuel, probably because hydrogen has a shorter quenching distance than methane, allowing for more complete combustion close to the combustion chamber walls.

Overall, the results from the study indicate that only minor adjustments are necessary for an engine calibrated and tuned for operation on pure hydrogen to run on hydrogen/methane blends.

довательском двигателе. Целью этих испытаний было определение изменений в ECU двигателя, которые необходимы для запуска двигателя на смеси водород / метан. Исходя из наших результатов, мы можем сделать следующие выводы.

Из-за более низкой скорости сгорания метана по сравнению с водородом время искрообразования должно быть увеличено с увеличением количества метана в смеси.

Различные свойства метана и водорода требуют корректировки времени впрыска для достижения той же нагрузки двигателя (рис.6), представляющей кривую, показывающую необходимые корректировки).

Поведение NO_x по выбросам чистого водорода по сравнению с водородно-метанными смесями демонстрирует те же тенденции. Из-за более медленной скорости сгорания метана абсолютный уровень выбросов несколько ниже с увеличением количества метана.

Количество несгоревшего метана по сравнению с водородом в выхлопе выше по сравнению с составом исходного топлива, вероятно, потому, что водород имеет более короткое расстояние гаше-

	<p>ния, чем метан, что обеспечивает более полное сгорание вблизи стен камеры сгорания.</p> <p>В целом, результаты исследования показывают, что для калибровки и настройки двигателя для работы на чистом водороде необходимы только незначительные корректировки для работы на смеси водород / метан.</p>
<p>Lean burn versus stoichiometric operation with EGR and 3- way catalyst of an engine fueled with natural gas and hydrogen enriched natural gas</p>	<p>Сгорание при стехиометрической работы с EGR и трехходовой катализатор двигателя, работающего на природном газе и обогащенном водородом природном газе</p>
<p>ABSTRACT</p> <p>Engine tests have been performed on a 9.6 liter spark- ignited engine fueled by natural gas and a mixture of 25/75 hydrogen/natural gas by volume. The scope of the work was to test two strategies for low emissions of harmful gases; lean burn operation and stoichiometric operation with EGR and a three-way catalyst. Most gas engines today, used in city buses, utilize the lean burn approach to achieve low NO_x formation and high thermal efficiency. However, the lean burn approach may not be sufficient for future emissions legislation. One way to</p>	<p>Аннотация</p> <p>Испытания двигателя проводились на 9,6-литровом искровом двигателе, работающем на природном газе, и в смеси 25/75 водорода / природного газа по объему. Объем работ состоял в том, чтобы проверить две стратегии для низких выбросов вредных газов; обедненного ожога и стехиометрической работы с EGR и трехкомпонентным катализатором. Большинство современных газовых двигателей, используемых в городских автобусах, используют подход с обедненным ожогом для достижения низкого образования NO_x и высокой тепловой эффективности. Тем не менее, под-</p>

improve the lean burn strategy is to add hydrogen to the fuel to increase the lean limit and thus reduce the NO_x formation without increasing the emissions of HC. Even so, the best commercially available technology for low emissions of NO_x, HC and CO today is stoichiometric operation with a three-way catalyst as used in passenger cars. The drawbacks of stoichiometric operation are low thermal efficiency because of the high pumping work, low possible compression ratio and large heat losses. The recirculation of exhaust gas is one way to reduce these drawbacks and achieve efficiencies that are not much lower than the lean burn technology. The experiments revealed that even with the 25 vol% hydrogen mixture, NO_x levels are much higher for the lean burn approach than that of the EGR and catalyst approach for this engine. However, a penalty in brake thermal efficiency has to be accepted for the EGR approach as the thermodynamic conditions are less ideal.

INTRODUCTION

In recent years, extensive research has been done to make spark-ignited en-

ход с обедненным ожогом может быть недостаточным для будущего законодательства о выбросах. Одним из способов улучшить стратегию бережливого сжигания является добавление водорода к топливу для увеличения сухого предела и, таким образом, уменьшение образования NO_x без увеличения выбросов HC. Тем не менее, лучшая коммерчески доступная технология для низких выбросов NO_x, HC и CO сегодня является стехиометрической работой с трехкомпонентным катализатором, используемым в легковых автомобилях. Недостатками стехиометрической работы являются низкий тепловой КПД из-за высокой работы нагнетания, низкой возможной степени сжатия и больших потерь тепла. Рециркуляция выхлопных газов является одним из способов уменьшения этих недостатков и достижения эффективности, которая не намного ниже технологии обедненного ожога. Эксперименты показали, что даже при использовании 25% -ной водородной смеси уровни NO_x намного выше для подхода обедненного ожога, чем для подхода EGR и катализатора для этого двигателя. Тем не менее, штраф за тепловую эффективность тормозов

gines fueled by natural gas more competitive to diesel engines. The focus has been on extending the lean limit of the combustion to increase efficiency and lower the NO_x emissions. By increasing the excess air there is a decrease in both the peak temperatures and the formation of nitrous oxides. At the same time, lean combustion makes it possible to achieve high efficiency at low and medium loads as less throttling results in a lower rate of pump work. The reduced peak temperature also leads to less heat loss which increases the efficiency. The knock tendency is also reduced, resulting in a higher compression ratio and thus an increase in efficiency. However, there is a tradeoff between the formation of NO_x and unburnt hydrocarbons (HC) as the lower combustion temperature increases the emissions of HC. Hydrogen has proven to be a well-suited additive to extend the lean limit because of its high reactivity and laminar flame speed. Several research projects have found that the tradeoff situation is improved when a relatively small amount of hydrogen is intro-

должен приниматься для подхода EGR, поскольку термодинамические условия менее идеальны.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы были проведены обширные исследования, направленные на то, чтобы искровые двигатели, работающие на природном газе, более конкурентоспособны для дизельных двигателей. Основное внимание было уделено увеличению сухого предела сгорания для повышения эффективности и снижения выбросов NO_x. Увеличение избыточного воздуха приводит к уменьшению как пиковых температур, так и образования оксидов азота. В то же время сухое сгорание позволяет достичь высокой эффективности при низких и средних нагрузках, поскольку меньшее дросселирование приводит к снижению скорости работы насоса. Сниженная пиковая температура также приводит к уменьшению потерь тепла, что повышает эффективность. Тенденция детонации также снижается, что приводит к более высокой степени сжатия и, следовательно, к повышению эффективности. Однако существует компромисс между образованием NO_x и несгоревшими углеводородами (HC), поскольку более

duced [3], [4]. When the amount of hydrogen addition is limited to about 20 vol%, problems such as backfire, uncontrolled ignition and low volumetric energy content are overcome. However, even if high excess air ratio and low NO_x is possible with the addition of hydrogen, the engine cannot always run very lean. In real engine applications, like in a city bus engine, the load and speed are highly transient. In order to achieve driveability, the engine requires variation in the air/fuel ratio with less lean mixtures in some situations like acceleration and low engine speed. Also, limitations in the response time and the accuracy of the control system results in lower λ in some situations. Very high levels of NO_x can then be emitted as the engine can run close to the conditions where the maximum amount of NO_x is formed. The engine used in this work had a maximum NO_x formation level at around $\lambda = 1.2$.

Another way of dealing with NO_x emissions is catalytic conversion. The three-way catalyst has proven to be very efficient in reducing NO_x, HC and CO simultaneously in gasoline

низкая температура горения увеличивает выбросы HC. Водород оказался хорошо подходящей добавкой для увеличения сухого предела из-за его высокой реактивности и скорости ламинарного пламени. Несколько исследовательских проектов обнаружили, что ситуация с компромиссом улучшается, когда вводится относительно небольшое количество водорода [3], [4]. Когда количество добавления водорода ограничено примерно 20 об.%, Устраняются такие проблемы, как обратный огонь, неконтролируемое зажигание и низкое объемное энергетическое содержание.

Однако даже если с добавлением водорода возможно высокое отношение избыточного воздуха и низкий уровень NO_x, двигатель не всегда может работать очень быстро. В реальных двигателях, например, в двигателе городской шины, нагрузка и скорость очень преходящи. Для достижения управляемости двигатель требует изменения соотношения воздух / топливо с менее обедненными смесями в некоторых ситуациях, таких как ускорение и низкая частота вращения двигателя. Кроме того, ограничения в времени отклика и точности системы управления приводят к сниже-

engines. The drawback is that the engine has to run close to the stoichiometric air/fuel ratio in order to make the catalytic NO_x reduction reactions occur, and this leads to low thermal efficiency.

but if the mixture is diluted by recirculated exhaust gas (EGR), similar advantages such as being diluted with air are achieved and the air/fuel ratio can remain stoichiometric. As with the lean limit for lean burn engines, there is a limit to how much recirculated exhaust gas the engine can tolerate before the combustion efficiency becomes poor and the cycle-to-cycle variations are severe. Introducing hydrogen to the fuel should also help to increase the achievable dilution level for an engine with EGR because of the high reactivity and high laminar flame speed.

Patrik Einewall et al. [1] at LTH in Sweden carried out experiments where lean burn operation was compared to stoichiometric operation with EGR and a three-way catalyst for a natural gas fueled engine. They found that stoichiometric operation with EGR and catalyst gave much lower

нию X в некоторых ситуациях. При этом могут выделяться очень высокие уровни NO_x, так как двигатель может работать вблизи условий, при которых образуется максимальное количество NO_x. Двигатель, используемый в этой работе, имел максимальный уровень образования NO_x около $X = 1,2$.

Другим способом борьбы с выбросами NO_x является каталитическая конверсия. Трехходовой катализатор оказался очень эффективным при одновременном снижении содержания NO_x, HC и CO в бензиновых двигателях. Недостатком является то, что двигатель должен работать вблизи стехиометрического соотношения воздух / топливо, чтобы сделать каталитические реакции восстановления NO_x, что приводит к низкой тепловой эффективности.

Если смесь разбавлена рециркулируемым выхлопным газом (EGR), достигнуты аналогичные преимущества, такие как разбавление воздухом, и соотношение воздух / топливо может оставаться стехиометрическим. Как и в случае сухого предела для двигателей с обедненным сжиганием, существует ограничение на то, насколько рециркулированный выхлопной газ может выдержать

NO_x and HC emissions (10-30 and 360-700 times lower, respectively) with only a slight decrease in brake efficiency compared to lean burn operation. The CO emissions however, were found to be about 10 times higher than for the EGR solution, but it should be noted that the X control was not optimized for the use of a three-way catalyst.

Also at LTH, Per Tunestal et al. [4] performed engine experiments with natural gas/hydrogen mixtures where they tested two combustion chambers with different turbulence levels. They found that the addition of hydrogen resulted in an improvement in the tradeoff between NO_x and HC and achieved a reduction in both compared to pure natural gas. The effect of the addition of hydrogen was more pronounced for the low turbulence slow burning combustion chamber than for the high turbulence chamber. Nellen et al. [5] developed a natural gas engine concept for stationary cogeneration applications. The engine was run on a stoichiometric mixture and was equipped with cooled EGR and a three-way catalyst. They

двигатель до того, как эффективность сгорания станет плохой, а колебания цикла к циклу будут серьезными. Введение водорода в топливо также должно помочь повысить достижимый уровень разбавления для двигателя с EGR из-за высокой реакционной способности и высокой скорости ламинарного пламени.

Patrik Einewall et al. [1] в LTH в Швеции были проведены эксперименты, в которых работа по сокращению ожога сравнивалась со стехиометрической работой с EGR и трехкомпонентным катализатором для двигателя, работающего на природном газе. Они обнаружили, что стехиометрическая работа с EGR и катализатором дает значительно меньшие выбросы NO_x и HC (соответственно 10-30 и 360-700 раз) с небольшим снижением эффективности торможения по сравнению с операцией на ожоге. Однако выбросы CO были примерно в 10 раз выше, чем для раствора EGR, но следует отметить, что контроль X не был оптимизирован для использования трехкомпонентного катализатора.

Также в LTH Per Tunestal et al. [4] провели эксперименты на двигателе с природными газами / водородными смеся-

demonstrated that high load (BMEP = 23 bar) and high fuel conversion efficiency (42%) is possible with very low emissions of NO_x, CO and THC. Reppert et al. [6] converted a Mack E7G lean burn natural gas engine to stoichiometric operation with cooled EGR and a three-way catalyst. The emissions test, which measured according to the U.S. Federal Test Procedure, revealed 0.049 g/bhp-hr NO_x, 0.002 g/bhp-hr PM, 0.435 g/bhp-hr THC, 0.000 g/bhp-hr NMHC and 4.153 g/bhp-hr CO. The brake specific fuel consumption was 2% above the lean burn engine calibrated at 2 g/bhp-hr NO_x.

Thorough testing of hydrogen/natural gas mixtures as fuel was performed by Munshi et al. [3]. Dynamometer testing indicated a 50% reduction in NO_x for stationary operation and 56% reduction in a transient cycle when the engine was fueled with a 20 vol% hydrogen mixture compared to natural gas. The SunLine Transit Agency tested two buses with these lean burn engines. The buses completed 24 000-mile field trials successfully.

The scope of the present work is to

ми, где они протестировали две камеры сгорания с различными уровнями турбулентности. Они обнаружили, что добавление водорода привело к улучшению компромисса между NO_x и HC и привело к снижению как по сравнению с чистым природным газом. Эффект добавления водорода был более выраженным для низкотемпературной камеры сгорания с низкой турбулентностью, чем для камеры с высокой турбулентностью.

Nellen et al. [5] разработал концепцию двигателя природного газа для стационарных применений когенерации. Двигатель работал на стехиометрической смеси и был оснащен охлажденным EGR и трехкомпонентным катализатором. Они продемонстрировали, что высокая нагрузка (BMEP = 23 бар) и высокая эффективность преобразования топлива (42%) возможны при очень низких выбросах NO_x, CO и THC.

Reppert et al. [6] превратил Mack E7G сжиженный природный газовый двигатель в стехиометрическую работу с охлажденным EGR и трехкомпонентным катализатором. Испытание на выбросы, измеренное в соответствии с Федеральной процедурой США, показало

investigate the effect of the addition of hydrogen when the engine is run stoichiometrically with EGR and a three-way catalyst. This work will compare the results with lean burn operation with respect to emissions of NO_x, HC and CO, and the effect on brake efficiency and cycle-to-cycle variations.

RESULTS

EMISSIONS BEFORE CATALYST

Because of the high laminar flame speed and low minimum ignition energy of hydrogen, it was expected to be able to increase the amount of excess air and the amount of EGR without increasing the emissions of HC and CO when using 25% hydrogen mixture. The experiments show the ability to increase lambda when the hydrogen mixture is used, but the possibility to increase the amount of EGR is not proven. This is associated with problems of water droplet entrainment in the inlet air with higher amounts of EGR. The water vapor from the recirculated exhaust condensed in the intercooler although it was supposed to be removed by the water drain at the bottom of the intercooler and by the

0.049 г / л.с. NO_x, 0,002 г / л.с., PM, 0,435 г / л.с. THC, 0,000 г / л.с. NMHC и 4,153 г / Bhp-hr CO. Удельный расход топлива на торможение был на 2% выше, чем у двигателя с обедненным ожо-гом, откалиброванного на 2 г / л.с. NO_x. Тщательные испытания смесей водорода и природного газа в качестве топлива были выполнены Munshi et al. [3]. Испытание динамометров показало 50% -ное снижение NO_x для стационарной работы и 56% -ное сокращение переходного цикла, когда двигатель был заправлен водородной смесью 20 об.% По сравнению с природным газом. Транзитное агентство SunLine провело испытания двух автобусов с этими двигателями с низким потреблением топлива. Автобусы успешно завершили 24 000-мильные полевые испытания.

Объем настоящей работы заключается в исследовании влияния добавления водорода, когда двигатель работает стехиометрически с EGR и трехкомпонентным катализатором. Эта работа будет сравнивать результаты с безнадежным режимом горения в отношении выбросов NO_x, HC и CO, а также влияние на эффективность торможения и изменения цикла на цикл.

extra water droplet trap mounted after the intercooler. This was not sufficient as misfire occurred in the cylinder where the droplets probably ended up. The problem was most evident when the hydrogen mixture was used because of the greater amount of water in the exhaust gas.

Figure 2 shows the emissions of NO_x, HC and CO at a load of 10 bar BMEP as a function of excess air ratio, X.

From X = 1.0, the NO_x emissions increase by X because of the amount of oxygen being available. The maximum NO_x emission is reached at around X = 1.2, thereafter it decreases as the combustion temperature falls.

The lean limit was defined as the point where the coefficient of variance in IMEP_n exceeded 10% in one cylinder. At the leanest points, it can be seen that the NO_x emissions are markedly lower for the 25 vol% hydrogen mixture, and at the same time the CO and HC is kept the same or even lower compared to the natural gas case.

HC emissions

The emissions of unburnt hydrocarbons have the opposite trend to NO_x

РЕЗУЛЬТАТЫ

ВЫБРОСЫ ПЕРЕД КАТАЛИЗАТОЙ

Из-за высокой скорости ламинарного пламени и низкой минимальной энергии воспламенения водорода ожидается, что он сможет увеличить количество избыточного воздуха и количество EGR без увеличения выбросов HC и CO при использовании 25% водородной смеси. Эксперименты показывают способность увеличивать лямбда при использовании водородной смеси, но возможность увеличения количества EGR не доказана. Это связано с проблемами улавливания капель воды во впускном воздухе с большим количеством EGR. Пары воды из рециркулированных выхлопных газов, сконденсированных в промежуточном охладителе, хотя и предполагалось, что они были удалены с помощью слива воды в нижней части промежуточного охладителя и дополнительной капельницы для воды, установленной после интеркулера. Этого было недостаточно, поскольку в цилиндре произошел осечек, где, вероятно, закончились капли. Проблема была наиболее очевидной, когда смесь водорода использовалась из-за большего количества воды в выхлопных газах.

in the lean burn cases. Emissions decrease with lambda as the available oxygen for oxidation increases, but start to increase at around lambda 1.2 as the lower flame temperature reduces the combustion efficiency.

Because of the above-mentioned problems with water entrainment, the EGR levels did not reach the "natural" dilution limit of stable combustion.

The high HC emission for natural gas at 10 bar BMEP is clearly caused by misfire due to water entrainment as the COV in IMEPn is over 50% in the cylinder that most probably received the water droplets. In all load cases the HC emissions are less for the hydrogen enriched gas. Part of the explanation is that there are fewer hydrocarbons in the fuel, but as 25% hydrogen by volume only represents about 8.4% by energy and 3.7% by mass, the reduction is more than the reduction in hydrocarbon in the fuel. The trend is shown for both the lean burn and the EGR cases. Figure 8 shows the HC emissions as mass HC per mass of natural gas supplied. This clearly shows that the addition of hydrogen improves the HC oxidation.

На рисунке 2 показаны выбросы NOx, HC и CO при нагрузке 10 бар BMEP в зависимости от избыточного соотношения воздуха X. Из X = 1.0 выбросы NOx увеличиваются на X из-за количества кислорода. Максимальная эмиссия NOx достигается при температуре около X = 1,2, после чего она уменьшается с понижением температуры горения. Нижний предел определялся как точка, в которой коэффициент дисперсии в IMEPn превышал 10% в одном цилиндре. В самых скудных точках видно, что выбросы NOx заметно ниже для 25% -ной водородной смеси, и одновременно CO и HC сохраняются одинаковыми или даже ниже по сравнению с газом.

Выбросы CH

Выбросы несгоревших углеводородов имеют противоположную тенденцию к NOx в случаях скудного ожога. Выбросы уменьшаются с лямбдой, поскольку доступный кислород для окисления увеличивается, но начинает увеличиваться примерно на лямбда 1.2, поскольку более низкая температура пламени снижает эффективность сгорания. Из-за вышеупомянутых проблем с улавливанием воды уровни EGR не достигли «естественного» предела разбавления

The CO emissions are very high for lambda 1 and the EGR cases (operation at lambda 1). This is because the lambda was set to slightly rich for the catalyst to work. In gasoline engines where the three-way catalyst is applied, the X oscillates between slightly rich and slightly lean to create both oxidizing and reducing conditions in the catalyst. The lambda control system used in these experiments did not oscillate. To be able to reduce NO_x, the lambda had to be set to slightly rich and as the CO emissions are very sensitive to lambda at this point, rather large emissions were formed.

No effect of hydrogen can be seen in the CO emissions for the EGR cases, but a decrease in CO is observed for the lean burn cases at constant load.

EMISSIONS AFTER CATALYST

The real advantage with EGR running with stoichiometric mixtures is that the three-way catalyst can be applied. Figure 11, Figure 12 and Figure 13 show the emissions of NO_x, HC and CO after the catalyst.

As mentioned above, the catalyst efficiency is very sensitive to lambda as the lambda control system is not an

для устойчивого сгорания. Высокий выброс HC для природного газа при 10 бар ВМЕР, очевидно, вызван пропуском зажигания из-за увлечения воды, поскольку COV в IMEP_n составляет более 50% в цилиндре, который, скорее всего, получил капельки воды. Во всех случаях нагрузки выбросы HC меньше для обогащенного водородом газа. Часть объяснения состоит в том, что в топливе меньше углеводородов, но поскольку 25% водорода по объему составляет лишь около 8,4% по энергии и 3,7% по массе, это сокращение больше, чем сокращение содержания углеводородов в топливе. Тенденция показана как для скудного ожога, так и для случаев EGR. На рисунке 8 показаны выбросы HC в виде массы HC на массу поставляемого природного газа. Это ясно показывает, что добавление водорода улучшает окисление HC.

Выбросы CO очень велики для лямбда-1 и случаев EGR (работа на лямбда-1). Это объясняется тем, что лямбда была немного обогащена катализатором для работы. В бензиновых двигателях, где применяется трехкомпонентный катализатор, X колеблется между слегка богатыми и слегка обедненными, чтобы со-

oscillating one. The lambda was adjusted to have a good reduction of NO_x and HC, but then some CO emissions had to be tolerated. Still, the CO emissions are for most cases lower than the CO emissions for the lean burn cases before the catalyst. The NO_x and HC emissions are very low compared to the lean burn cases at all loads, even though the catalyst efficiency is poor at some points where lambda has floated a bit off the set point. This would probably be avoided if the engine had an oscillating lambda control system.

Figure 14 shows how the three-way catalyst operates. The NO_x reduction only functions near lambda 1. At higher lambdas the NO_x reduction is practically zero. The non-zero value is probably due to natural variation as the NO_x emissions before and after the catalyst are not measured simultaneously. In this case the exhaust sample line is switched to collect sample gas before and after the catalyst. The HC emission is also poorly reduced at higher lambda, but a catalyst designed to operate under lean conditions would probably be able to reduce HC

здать как окислительные, так и восстановительные условия в катализаторе. Лямбда-система управления, используемая в этих экспериментах, не колебалась. Чтобы иметь возможность уменьшить выбросы NO_x, лямбда должна была быть немного богатой, и поскольку выбросы CO очень чувствительны к лямбда в этот момент, были сформированы довольно большие выбросы.

В выбросах CO для случаев EGR не наблюдается никакого влияния водорода, но наблюдается уменьшение CO для случаев скудного ожога при постоянной нагрузке.

ВЫБРОСЫ ПОСЛЕ КАТАЛИЗАТОРА

Реальное преимущество с EGR, работающим со стехиометрическими смесями, заключается в том, что может применяться трехсторонний катализатор. Рисунок 11, Рисунок 12 и Рисунок 13 показывают выбросы NO_x, HC и CO после катализатора.

Как упоминалось выше, эффективность катализатора очень чувствительна к лямбда, поскольку система управления лямбда не является осциллирующей. Лямбда была скорректирована с тем, чтобы иметь хорошее снижение NO_x и HC, но затем необходимо было допус-

more efficiently. The CO is efficiently reduced over the whole lambda spectrum.

Figure 15 illustrates that the three-way catalyst is able to reduce CO, HC and NOx efficiently when the engine is operated at lambda 1 with EGR. An oscillating lambda control system may result in an even better reduction. The results show that it should be possible to meet Euro 5 emission legislation with the stoichiometric + EGR and three-way catalyst approach both for natural gas and the 25 vol% hydrogen mixture. The emission limits for the Euro 5 transient cycle are 2 g/kWh NOx, 1.65 g/kWh THC and 4 g/kWh CO. For this engine, the lean burn approach will not be able to meet Euro 5, even when using the 25 vol% hydrogen mixture. Even if the NOx was kept under 2 g/kWh, the HC emissions are far too high without after-treatment. It should be noted that the Volvo engine used in these tests is not the cutting edge in gas engine technology. The combustion chamber, called "Turbine" cf. [4], is a rather slow burning low turbulence chamber.

CONCLUSIONS

кать некоторые выбросы CO. Тем не менее, выбросы CO в большинстве случаев ниже, чем выбросы CO для сухих случаев ожога перед катализатором. Выбросы NOx и HC очень низки по сравнению с жесткими ожогами при всех нагрузках, даже несмотря на то, что эффективность катализатора в некоторых точках, где лямбда немного отклонилась от заданной точки, плохо работает. Этого, вероятно, можно избежать, если бы двигатель имел колебательную систему управления лямбдой.

На рисунке 14 показано, как работает трехпозиционный катализатор. Снижение NOx действует только вблизи лямбда 1. При более высоких лямбдах уменьшение NOx практически равно нулю. Необязательное значение, вероятно, связано с естественным изменением, поскольку выбросы NOx до и после катализатора не измеряются одновременно. В этом случае линия выхлопных газов переключается на сбор пробного газа до и после катализатора. Выбросы HC также слабо снижаются при более высокой лямбда, но катализатор, предназначенный для работы в условиях обеднения, вероятно, будет способен более эффективно снижать концентра-

The addition of hydrogen to natural gas narrows down the difference between the emission levels for lean burn operation and stoichiometric operation with EGR and a three-way catalyst. However, it was not possible to get close to the very low NO_x and HC emissions found with EGR operation when using lean burn operation with this engine.

With this lambda control, the CO emissions for the EGR and catalyst case are in the same range or lower than the CO emissions of lean burn operation without catalyst both for natural gas and the 25 vol% hydrogen mixture. The CO and HC emissions for the lean burn cases are lower for the 25 vol% mixture at the same λ , also when corrected for the reduced HC content in the 25 vol% hydrogen mixture. But a large effect of hydrogen addition to CO and HC is first seen at excess air ratios higher than the lean limit of natural gas operation, where the 25 vol% mixture has still not crossed the defined lean limit.

The ability to reduce NO_x without increasing HC emissions by the addition of hydrogen to extend the lean limit is

цию УВ. CO эффективно снижается по всему лямбда-спектру.

На рисунке 15 показано, что трехсторонний катализатор способен эффективно снижать CO, HC и NO_x, когда двигатель работает на лямбда-1 с EGR. Осциллирующая система управления лямбдой может привести к еще большему снижению.

Результаты показывают, что должно быть возможным соответствовать законодательству о выбросах в Евро 5 со стехиометрическим + EGR и трехсторонним катализаторным подходом как для природного газа, так и для водородной смеси 25 об.%. Пределы выбросов для переходного цикла Euro 5 составляют 2 г / кВт.ч NO_x, 1,65 г / кВтч THC и 4 г / кВтч CO. Для этого двигателя подход с обедненным ожогом не сможет соответствовать евро 5, даже если используется 25 Об.% Водородной смеси. Даже если содержание NO_x было ниже 2 г / кВтч, выбросы УВ слишком высоки без последующей обработки. Следует отметить, что двигатель Volvo, используемый в этих испытаниях, не является передовой технологией газовых двигателей. Камера сгорания, называемая «Турбина», ср. [4], является довольно

confirmed. No consistent trend can be seen in NO_x emissions at the same X with or without hydrogen addition with the ignition timing strategy that was employed.

The maximum brake thermal efficiency is higher for lean burn operation than for EGR operation, both for natural gas and hydrogen enriched natural gas. Slightly higher efficiency for EGR operation may have been possible if the engine could handle higher EGR levels as an increasing trend with the EGR level is observed for most load cases. Higher efficiency is observed for the 25 vol% hydrogen mixture in most load cases, both for lean burn and EGR operation.

A better solution for water removal in the inlet stream is necessary to achieve higher EGR levels and determine the possibility to extend the limit of dilution by hydrogen enrichment. Also, more tests near the lean limit for lean burn operation would be beneficial to more accurately determine the lean limit and quantify the extension due to the addition of hydrogen at different loads.

медленной камерой с низкой турбулентностью.

ВЫВОДЫ

Добавление водорода к природному газу сужает разницу между уровнями эмиссии для режима обедненного сжигания и стехиометрической работой с EGR и трехкомпонентным катализатором. Тем не менее, было невозможно приблизиться к очень низким выбросам NO_x и HC, обнаруженным при работе с рециркуляцией отработавших газов при использовании режима сжиженного горения с этим двигателем.

С помощью этого лямбда-управления выбросы CO для EGR и корпуса катализатора находятся в том же диапазоне или ниже, чем выбросы CO в режиме обедненного сжигания без катализатора как для природного газа, так и для 25% -ной водородной смеси. Выбросы CO и HC для случаев сжигания ожога ниже для смеси 25 об.% На том же X, также при корректировке для уменьшения содержания HC в 25% -ной водной смеси. Но большой эффект добавления водорода к CO и HC впервые наблюдается при избыточных соотношениях воздуха выше, чем обедненный предел работы природного газа, когда смесь 25 об.%

Все еще не пересекала определенный постный предел.

Подтверждена способность снижать выбросы NOx без увеличения выбросов УВ за счет добавления водорода для увеличения сухого предела. Не наблюдается постоянной тенденции к выбросам NOx на том же X с добавлением водорода или без него с использованием стратегии времени зажигания, которая была использована.

Максимальная эффективность термического торможения выше для режима безводного сжигания, чем для работы EGR, как для природного газа, так и для обогащенного водородом природного газа. Вероятно, более высокая эффективность работы EGR могла быть возможной, если двигатель мог работать с более высокими уровнями EGR, поскольку возрастающая тенденция с уровнем EGR наблюдается для большинства случаев нагрузки. Более высокая эффективность наблюдается для 25% -ной водородной смеси в большинстве случаев нагрузки, как для постного ожога, так и для работы с EGR.

Лучшее решение для удаления воды во входном потоке необходимо для достижения более высоких уровней EGR и

	определения возможности продления предела разбавления путем обогащения водородом. Кроме того, большее количество тестов вблизи сухого предела для безаварийного режима горения было бы полезно для более точного определения предела сухости и количественного определения расширения из-за добавления водорода при разных нагрузках.
--	---

1.6 Заключение по первой главе постановки проблемы исследования

Критический обзор известных источников показал, что для снижения концентрации продуктов неполного сгорания в отработавших газах применяются различные методы. Одним из наиболее перспективных является метод воздействия на рабочий процесс через добавку в топливо промотирующего элемента, а именно водорода в количестве до 5-6% от массы топлива. Данный способ позволит повысить стабильность процесса сгорания и его эффективность, что особенно важно на режимах глубокого дросселирования.

ГЛАВА 2 Оборудование, использованное в эксперименте

Для изучения условий и характеристик влияния добавки водорода в бензовоздушную смесь для снижения концентрации продуктов неполного сгорания в отработавших газах, применялись стендовые исследования на одноцилиндровой установке УИТ-85 при частоте вращения 600 и 900 мин⁻¹ позволяющей снизить неравномерность и повысить точности проводимых исследований и в моторном стенде с двигателем ВАЗ-2111 при степени сжатия 9,9 и 7,5 на режиме холостого хода.

2.1 Описание одноцилиндрового двигателя УИТ-85

На рисунке 2.1 представлена схема и на рисунке 2.2 сама установка УИТ-85 это четырехтактная установка с одним цилиндром и карбюраторной системой питания, в которой имеется стартер-генератор для поддержания постоянной заданной частоты вращения, с изменяемой степенью сжатия от 4 до 10 и подогреваемым трубопроводом для гомогенизации топливно-воздушной смеси, а охлаждающая жидкость имеет постоянную температуру 100 градусов Цельсия.

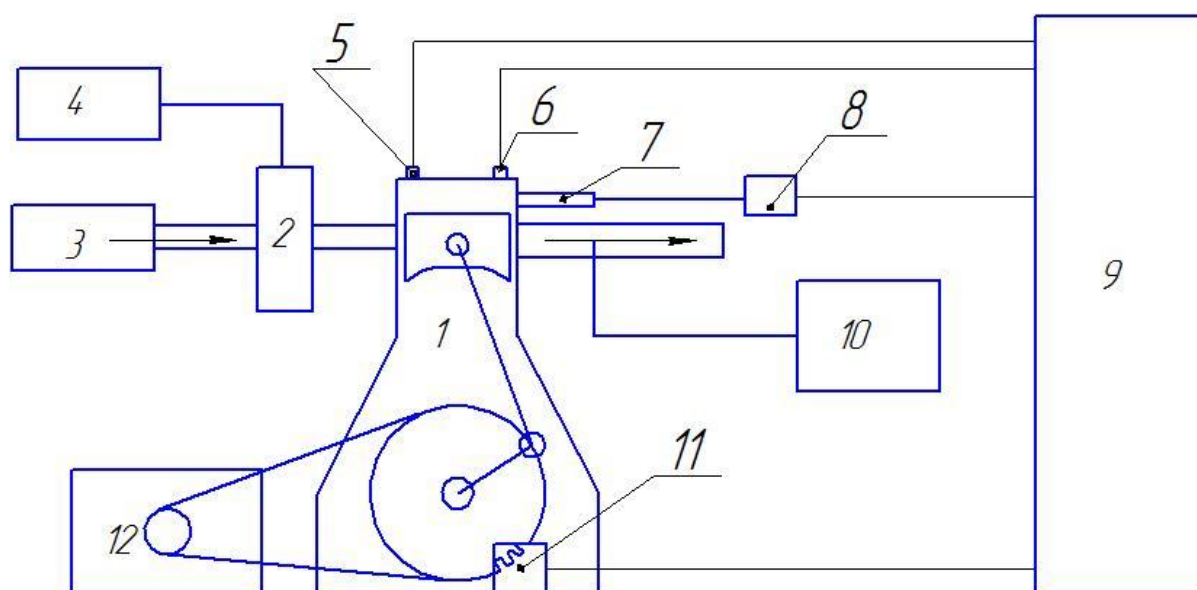


Рисунок 2.1 – Схема доработанной экспериментальной установки

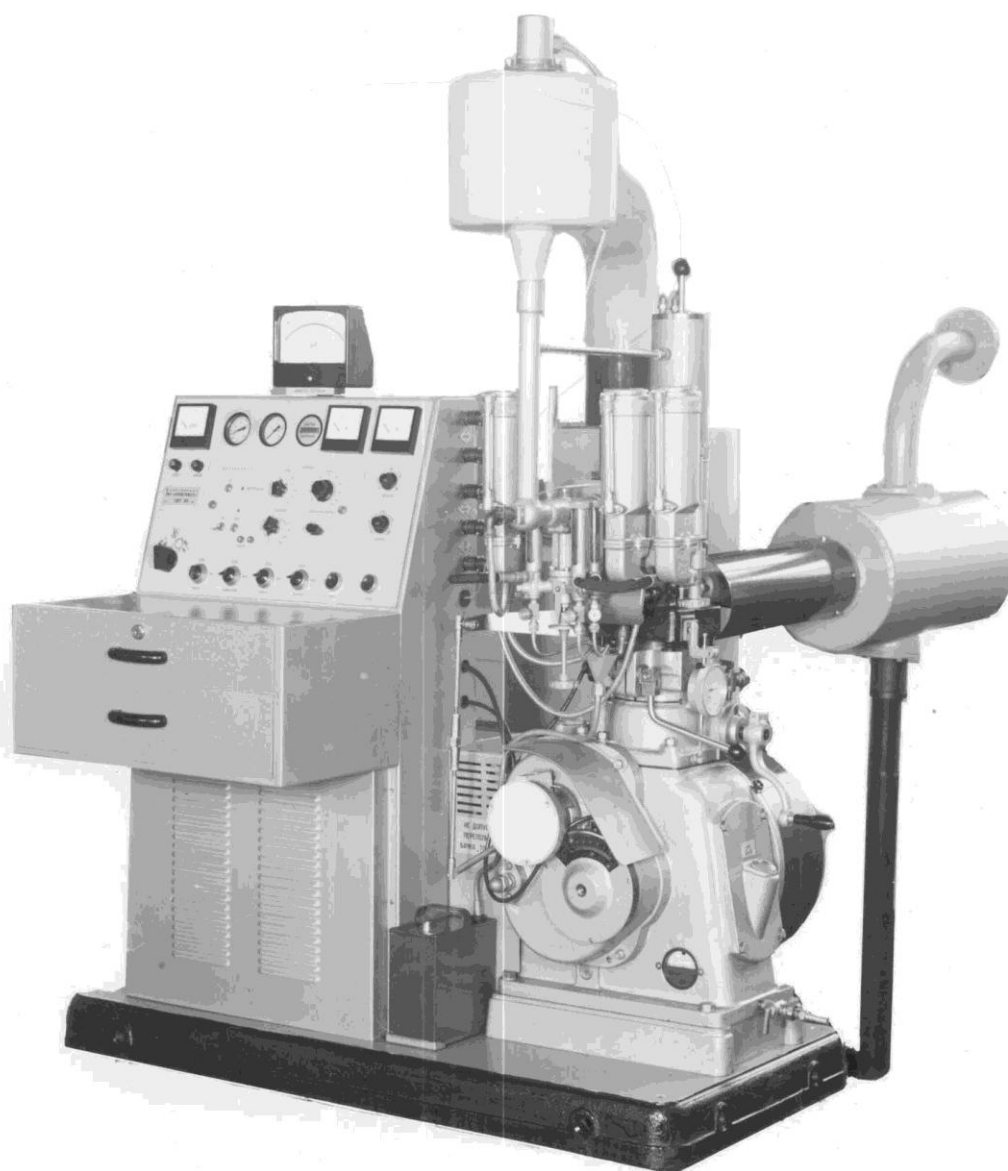
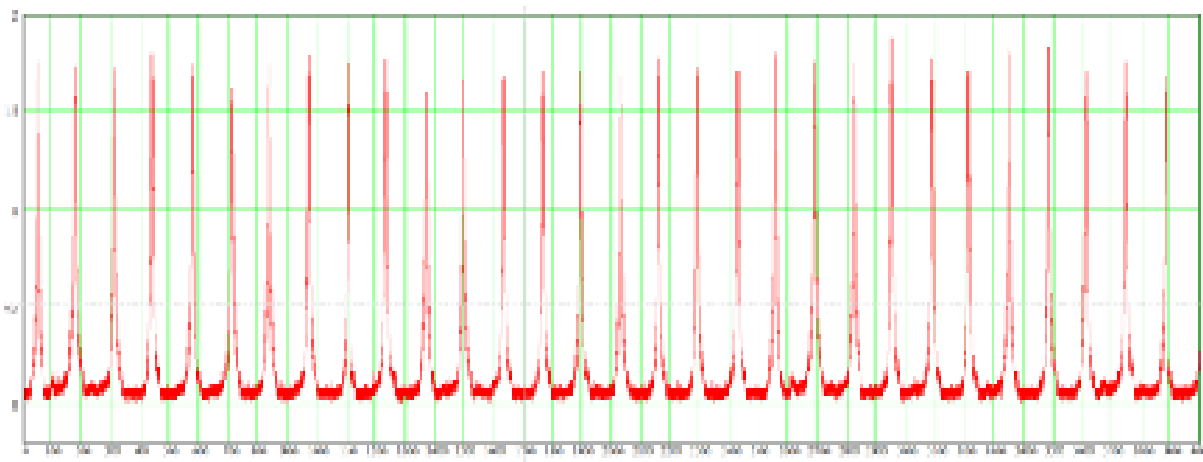


Рисунок 2.2 – Общий вид УИТ-85

На рисунке 2.1 показано, что в одноцилиндровой установке УИТ-85 (1), привод коленчатого вала приводится от асинхронного электромотора (12), что позволяет поддерживать постоянный скоростной режим с помощью обратной связи от датчика положения коленчатого вала (11). Топливо-воздушная смесь поступает в карбюратор (2) из системы (4), подающей и измеряющей расход топлива, и системы (3), подающей и измеряющей расход

воздуха. Для оценки токсичности отработавшие газы отбираются из системы выпуска и подаются в газоанализатор (10).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.3 - Осциллограмма давления в двигателе УИТ-85 (а) и применяемые ионизационные зонды: 3-х электродный с углубленным центральным электродом (б); 2-х электродным с датчиком давления (в), датчик рядом со свечей зажигания (г).

На рисунке 2.3 представлена осциллограмма давления в двигателе УИТ-85 (а) и применяемые ионизационные зонды: 3-х электродный с углубленным центральным электродом (б); 2-х электродным с датчиком давления (в), датчик рядом со свечей зажигания (г). Из осциллограммы мы можем видеть высокую равномерность протекания циклов.

2.2 Описание двигателя ВАЗ с изменяемой степенью сжатия

Моторный стенд с двигателем ВАЗ-2111 представлен на рисунке 2.4а, а на рисунке 2.4б представлена пластина для изменения степени сжатия и расширения возможных вариантов регулирования работы двигателя и поиска возможностей снижения концентрации продуктов неполного сгорания в отработавших газах.



Рисунок 2.4 - Двигатель ВАЗ-2111 с распределенным впрыском топлива (а), и пластина для регулирования степени сжатия (б)

Исследования влияния добавки водорода на токсичность по продуктам сгорания проводились на режимах холостого хода для двух степеней сжатия

7,5 и 9,9 путем снятия регулировочных характеристик по составу смеси. Состав смеси варьировался от коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,8$ до максимально возможного обеднения смеси. Угол опережения зажигания выбирался оптимальным, из условия минимального расхода топлива.

2.3 Выводы по второй главе

Показано что применяемое оборудование соответствует теме и задачам исследования и позволяет полностью выполнить поставленные цели работы.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

3.1 Результаты экспериментального исследования по выявлению влияния добавки водорода на СН и СО в отработавших газах

Результаты оценки токсичности по продуктам неполного сгорания при добавке водорода в бензовоздушную смесь с оценкой погрешности определения варьируемых параметров приведена в таблице 3.1

Таблица 3.1 - Токсичности по продуктам неполного сгорания при добавке водорода в бензовоздушную смесь с оценкой погрешности определения варьируемых параметров в УИТ-85

Коэффициент избытка воздуха	Доля водорода по массе, %	СН, ppm	СО, %	Степень сжатия	Угол опережения зажигания	Частота вращения, мин ⁻¹	Погрешность определения СО и СН, %
1,04735	0	0	-	7	13	900	5
1,0004	0	0	-	7	13	900	5
1,07986	0	1801	-	7	13	900	5
1,14487	0	1641	-	7	13	900	5
1,2171	0	1321	-	7	13	900	5
1,3435	0	1241	-	7	13	900	5
1,27488	0	1601	-	7	13	900	5
1,43379	0	2082	-	7	13	900	5
0,92456	0	3763	-	7	13	900	5
0,95345	0	3843	-	7	13	900	5
1,00402	0	4043	-	7	13	900	5
0,98596	0	120	0,045	7	13	900	5
0,92095	0	150	2,8	7	13	900	5
1,10875	0	67	0,075	7	13	900	5
1,1557	0	70	0,075	7	13	900	5
1,25863	0	80	0,085	7	13	900	5
0,89619	3,88695	80	2,1	7	13	900	5
0,98604	4,31576	50	0,05	7	13	900	5
1,07992	4,77223	40	0,05	7	13	900	5
1,19134	5,32553	60	0,05	7	13	900	5
1,31098	5,93416	150	0,05	7	13	900	5
1,30652	4,70894	250	0,07	7	13	900	5
1,21768	4,35634	1300	0,07	7	13	900	5
1,07158	3,78763	200	0,06	7	13	900	5
0,9882	3,46915	150	0,07	7	13	900	5
0,91885	3,20754	190	2	7	13	900	5

Продолжение таблица 3.1

0,96623	2,63516	100	0,5	7	13	900	5
0,93802	2,55366	115	1,51	7	13	900	5
1,01613	2,78005	63	0,075	7	13	900	5
1,09039	2,99738	50	2,05	7	13	900	5
1,19744	3,31432	70	0,05	7	13	900	5
1,25569	3,83712	70	0,06	7	13	900	5
1,40813	4,35005	110	0,05	7	13	900	5
0,9526	5,13142	110	0,25	7	13	900	5
1,01816	5,52998	70	0,05	7	13	900	5
1,18004	6,54298	75	0,05	7	13	900	5
1,13559	6,26067	70	0,05	7	13	900	5
1,0116	2,05537	40	0,05	7	13	900	5
0,91428	1,84914	100	2,1	7	13	900	5
1,16228	2,37845	40	0,05	7	13	900	5
1,27625	2,62592	130	0,05	7	13	900	5
1,00672	0,79141	105	0,05	7	13	900	5
0,93057	0,73053	102	2,25	7	13	900	5
1,05161	0,82738	30	0,05	7	13	900	5
1,15838	0,91316	40	0,05	7	13	900	5
1,30444	1,42747	60	0,06	7	13	900	5
1,2832	1,98255	100	0,06	7	13	900	5
1,14916	1,76694	150	0,05	7	13	900	5
1,02044	1,56185	55	0,05	7	13	900	5
0,93064	1,41986	105	1,55	7	13	900	5
1,00763	0	114,6814	-	7	10	900	5
1,1232	0	118,8047	-	7	13	900	5
1,20626	0	139,9669	-	7	23	900	5
1,31461	0	151,4727	-	7	27	900	5
1,39407	0	168,1225	-	7	32	900	5
1,0100912	0	130,00	-	7	11	600	5
1,09221243	0	50,00	-	7	12	600	5
1,19897004	0	60,00	-	7	16	600	5
1,30299027	0	50,00	-	7	25	600	5
1,39332363	0	30,00	-	7	28	600	5
1,29972412	1,042105	180	-	7	21	600	5
1,38244054	0,979971	210	-	7	25	600	5
1,18905831	0,998642	260	-	7	15	600	5
1,08919721	1,10243	550	-	7	10	600	5
1,02982917	1,040887	100	-	7	10	600	5
1,39104081	2,00809	110	-	7	23	600	5
1,28931313	2,070022	110	-	7	21	600	5
1,02680248	2,11193	500	-	7	10	600	5
1,22352384	2,083685	520	-	7	16	600	5
1,13330173	2,049962	300	-	7	9	600	5
1,07159589	2,810637	140	-	7	9	600	5
1,1162317	2,9357	270	-	7	9	600	5
1,20998112	3,038081	230	-	7	14	600	5
1,2943462	3,107125	150	-	7	20	600	5
1,01900838	2,930868	0	-	7	9	600	5

Продолжение таблица 3.1

1,4024075	3,085904	300	-	7	22	600	5
1,10231036	3,976785	250	-	7	8	600	5
1,31616939	4,021034	180	-	7	19	600	5
1,19908444	4,004368	130	-	7	13	600	5
1,00891788	4,081816	0	-	7	9	600	5
1,39863318	3,959984	0	-	7	21	600	5
1,49413319	3,953864	840	-	7	23	600	5
1,09912034	5,00766	60	-	7	10	600	5
1,20793369	4,980206	400	-	7	12	600	5
1,31116964	4,906614	590	-	7	18	600	5
1,00862143	4,917582	140	-	7	8	600	5
1,40008585	4,959257	0	-	7	20	600	5
1,50317405	5,020487	400	-	7	22	600	5
1,32206656	6,095932	90	-	7	17	600	5
1,21444507	6,015635	90	-	7	11	600	5
1,09678587	5,937369	150	-	7	9	600	5
1,02038494	6,08179	0	-	7	8	600	5
1,40957418	6,063812	80	-	7	19	600	5
1,4846185	5,922662	300	-	7	21	600	5
1,61481916	6,031999	210	-	7	25	600	5
0,99679	0	60	0,075	7	6	900	5
0,99679	0	60	0,07	7	9	900	5
0,99679	0	101	0,035	7	16	900	5
0,99679	0	70	0,05	7	19	900	5
1,31461	0	55	0,075	7	16	900	5
1,31461	0	70	0,08	7	19	900	5
1,31461	0	80	0,08	7	26	900	5
1,31461	0	100	0,06	7	30	900	5
1,40129	0	200	0,075	7	16	900	5
1,40129	0	170	0,06	7	19	900	5
1,40129	0	150	0,06	7	26	900	5
1,40129	0	150	0,06	7	30	900	5
1,310106	4,609744	190	0,075	7	16	900	5
1,310106	4,609744	175	0,075	7	19	900	5
1,310106	4,609744	190	0,075	7	26	900	5
1,310106	4,609744	200	0,06	7	30	900	5
1,369835	4,843571	220	0,055	7	16	900	5
1,369835	4,843571	245	0,06	7	19	900	5
1,369835	4,843571	200	0,06	7	26	900	5
1,369835	4,843571	197	0,06	7	30	900	5
1,395255	4,943783	285	0,055	7	16	900	5
1,395255	4,943783	290	0,05	7	19	900	5
1,395255	4,943783	260	0,055	7	26	900	5
1,395255	4,943783	240	0,06	7	30	900	5
1,295344	3,205805	70	0,08	7	16	900	5
1,295344	3,205805	70	0,08	7	19	900	5
1,295344	3,205805	70	0,08	7	26	900	5
1,423922	3,437451	106	0,06	7	16	900	5
1,423922	3,437451	98	0,06	7	19	900	5

Продолжение таблица 3.1

1,423922	3,437451	90	0,06	7	26	900	5
1,423922	3,437451	90	0,06	7	30	900	5
1,416138	2,024476	130	0,06	7	16	900	5
1,416138	2,024476	135	0,06	7	19	900	5
1,416138	2,024476	105	0,06	7	26	900	5
1,416138	2,024476	100	0,06	7	30	900	5
1,357504	1,936878	140	0,075	7	16	900	5
1,357504	1,936878	150	0,075	7	19	900	5
1,357504	1,936878	135	0,075	7	26	900	5
1,357504	1,936878	150	0,06	7	30	900	5
1,418022	1,13163	240	0,01	7	16	900	5
1,418022	1,13163	210	0,075	7	19	900	5
1,418022	1,13163	190	0,065	7	26	900	5
1,418022	1,13163	182	0,065	7	30	900	5
1,282138	6,033709	180	0,075	7	16	900	5
1,282138	6,033709	190	0,06	7	19	900	5
1,282138	6,033709	200	0,06	7	26	900	5
1,282138	6,033709	198	0,055	7	30	900	5
1,395441	6,053174	160	0,055	7	16	900	5
1,395441	6,053174	160	0,055	7	19	900	5
1,395441	6,053174	150	0,06	7	26	900	5
1,395441	6,053174	150	0,06	7	30	900	5
1,487269	5,889655	190	0,055	7	16	900	5
1,487269	5,889655	190	0,055	7	19	900	5
1,487269	5,889655	160	0,06	7	26	900	5
1,487269	5,889655	140	0,055	7	30	900	5
1,025685	0	170	0,2	7	9	900	5
1,025685	0	75	0,25	7	16	900	5
1,025685	0	85	0,02	7	19	900	5
0,848719	0	185	6	7	9	900	5
0,848719	0	200	6,25	7	16	900	5
0,848719	0	210	6,5	7	19	900	5
1,17376	0	50	0,1	7	9	900	5
1,17376	0	67	0,05	7	16	900	5
1,17376	0	70	0,05	7	19	900	5
1,17376	0	80	0,051	7	26	900	5
1,089573	3,744284	90	0,05	7	9	900	5
1,089573	3,744284	90	0,03	7	16	900	5
1,089573	3,744284	89	0,025	7	19	900	5
1,089573	3,744284	90	0,025	7	26	900	5
1,133158	2,529765	101	0,055	7	9	900	5
1,133158	2,529765	90	0,05	7	16	900	5
1,133158	2,529765	100	0,05	7	19	900	5
1,133158	2,529765	103	0,045	7	26	900	5
1,155069	1,400822	105	0,075	7	9	900	5
1,155069	1,400822	110	0,05	7	16	900	5
1,155069	1,400822	100	0,045	7	19	900	5
1,155069	1,400822	100	0,045	7	26	900	5
1,060876	4,967651	130	0,05	7	9	900	5

Продолжение таблица 3.1

1,060876	4,967651	120	0,045	7	16	900	5
1,060876	4,967651	130	0,045	7	19	900	5
1,060876	4,967651	125	0,045	7	26	900	5
0,910643	4,195552	270	2,6	7	9	900	5
0,910643	4,195552	270	2,7	7	16	900	5
0,910643	4,195552	275	2,75	7	19	900	5
1,000794	2,727598	110	0,15	7	9	900	5
1,000794	2,727598	120	0,15	7	16	900	5
1,000794	2,727598	130	0,25	7	19	900	5
1,033945	1,575357	140	0,1	7	9	900	5
1,033945	1,575357	125	0,1	7	16	900	5
1,033945	1,575357	130	0,1	7	19	900	5
0,98235	3,108496	225	0,8	7	9	900	5
0,98235	3,108496	220	0,6	7	16	900	5
0,98235	3,108496	223	0,8	7	19	900	5
0,914304	6,282921	215	2,6	7	9	900	5
0,914304	6,282921	222	2,5	7	16	900	5
0,914304	6,282921	215	2,6	7	19	900	5
1,13013	6,334273	100	0,06	7	9	900	5
1,13013	6,334273	99	0,05	7	16	900	5
1,13013	6,334273	98	0,05	7	19	900	5
1,13013	6,334273	100	0,05	7	26	900	5
1,210251	3,999873	80	0,06	7	9	900	5
1,210251	3,999873	89	0,05	7	16	900	5
1,210251	3,999873	90	0,05	7	19	900	5
1,210251	3,999873	100	0,05	7	26	900	5
1,26366	1,951143	75	0,1	7	9	900	5
1,26366	1,951143	85	0,07	7	16	900	5
1,26366	1,951143	90	0,065	7	19	900	5
1,26366	1,951143	105	0,07	7	26	900	5
0,914304	0	60	0,075	7	6	900	5
0,914304	0	60	0,07	7	9	900	5
0,914304	0	101	0,035	7	16	900	5
1,13013	0	70	0,05	7	19	900	5
1,13013	0	55	0,075	7	16	900	5
1,13013	0	70	0,08	7	19	900	5
1,13013	0	80	0,08	7	26	900	5
1,210251	0	100	0,06	7	30	900	5
1,210251	0	200	0,075	7	16	900	5
1,210251	0	170	0,06	7	19	900	5
1,210251	0	150	0,06	7	26	900	5
1,26366	0	150	0,06	7	30	900	5
1,26366	4,609744	190	0,075	7	16	900	5
1,26366	4,609744	175	0,075	7	19	900	5
1,26366	4,609744	190	0,075	7	26	900	5
0,712	0	510	-	7	16,91	600	5
0,786	0	425	-	7	15,80	600	5
0,849	0	450	-	7	16,58	600	5
1,013	0	300	-	7	16,47	600	5

Продолжение таблица 3.1

1,118	0	315	-	7	16,47	600	5
1,162	0	280	-	7	16,47	600	5
0,723	0	580	-	7	15,91	600	5
0,805	0	560	-	7	16,13	600	5
0,902	0	320	-	7	15,58	600	5
1,294	0	360	-	7	16,91	600	5
0,74	3	500	-	7	16,80	600	5
0,844	3	440	-	7	16,47	600	5
1,05	3	292	-	7	16,47	600	5
1,281	3	340	-	7	15,91	600	5
1,393	3	420	-	7	15,91	600	5
0,754	5	463	-	7	17,02	600	5
0,893	5	370	-	7	16,91	600	5
1,031	5	304	-	7	16,80	600	5
1,262	5	270	-	7	15,91	600	5
1,423	5	280	-	7	15,91	600	5
0,7303	0	257	-	5,9	17,45	900	5
0,8266	0	203	-	5,9	16,63	900	5
0,9089	0	186	-	5,9	15,8	900	5
0,9093	0	180	-	5,9	16,3	900	5
0,9881	0	130	-	5,9	15,8	900	5
1,0102	0	123	-	5,9	19,39	900	5
1,2265	0	120	-	5,9	15,97	900	5
1,2036	0	150	-	5,9	17,98	900	5
1,1263	0	140	-	5,9	16,8	900	5
1,3072	0	125	-	5,9	16,63	900	5
1,4425	0	310	-	5,9	16,63	900	5
1,5281	0	3000	-	5,9	18,3	900	5
0,7603	0,0237	220	-	5,9	16,63	900	5
0,834	0,0225	210	-	5,9	16,47	900	5
0,9582	0,022	150	-	5,9	19,92	900	5
1,2348	0,0315	90	-	5,9	15,97	900	5
1,3559	0,0308	106	-	5,9	18,86	900	5
1,4431	0,0305	185	-	5,9	15,47	900	5
0,7566	0,0391	190	-	5,9	18,33	900	5
0,8341	0,0381	180	-	5,9	19,74	900	5
0,9493	0,0366	160	-	5,9	17,62	900	5
1,1483	0,0546	94	-	5,9	16,13	900	5
1,2364	0,0511	100	-	5,9	17,63	900	5
1,3507	0,052	130	-	5,9	15,8	900	5
1,4239	0	570	-	5,9	25,8	900	5
1,3036	0	170	-	5,9	27,33	900	5
1,2084	0	159	-	5,9	25,56	900	5
1,1318	0	136	-	5,9	23,8	900	5
1,0496	0	144	-	5,9	23,97	900	5
1,0068	0	165	-	5,9	23,97	900	5
0,9715	0	180	-	5,9	24,13	900	5

Таблица 3.2 - Токсичности по продуктам неполного сгорания при добавке водорода в бензовоздушную смесь с оценкой погрешности определения варьируемых параметров в моторном стенде ВАЗ-2111

Коэффициент избытка воздуха	Доля водорода по массе, %	СН, ppm	СО, %	Степень сжатия	Угол опережения зажигания	Частота вращения, мин ⁻¹	Погрешность определения СО и СН, %
1,2	0	970	0,3	9,9	27	850	5
1	0	940	1,18	9,9	30	850	5
0,95	0	760	1,88	9,9	26	850	5
0,9	0	640	5,36	9,9	25	850	5
0,8	0	1080	19,9	9,9	30	850	5
0,8	0	1250	20,42	9,9	30	880	5
0,9	0	940	4,74	9,9	30	880	5
0,85	0	710	11,98	9,9	30	880	5
0,95	0	790	2,52	9,9	27	880	5
1	0	850	1,35	9,9	26	880	5
1,05	0	600	0,59	9,9	25	880	5
1,1	0	580	0,4	9,9	24	880	5
1,2	0	780	0,32	9,9	25	880	5
1,2	0	650	0,36	9,9	25	880	5
1,3	0	820	0,34	9,9	27	880	5
1,4	0	1030	0,34	9,9	30	880	5
0,748713	2,598212	1900	36	9,9	30	880	5
0,827152	3,334756	570	8,43	9,9	25	880	5
0,869196	3,580636	500	4,23	9,9	28	880	5
0,907244	3,780776	550	2,09	9,9	30	880	5
0,988797	4,153928	450	0,65	9,9	27	880	5
0,988797	4,135786	630	0,46	9,9	27	880	5
1,078552	4,218697	540	0,2	9,9	25	880	5
1,168307	4,218697	480	0,2	9,9	25	880	5
1,254995	4,266212	440	0,18	9,9	25	880	5
1,321715	4,246602	580	0,18	9,9	22	880	5
1,39997	4,208947	660	0,19	9,9	22	880	5
1,476949	4,099619	900	0,18	9,9	25	880	5
0,784856	0,749499	1630	17,95	9,9	35	880	5
0,879762	0,90752	1110	4,11	9,9	32	880	5
0,927479	0,938086	1100	1,74	9,9	30	880	5
0,975782	0,94558	1190	0,86	9,9	30	880	5
0,975782	0,976791	960	0,87	9,9	30	880	5
1,073049	0,970783	1170	0,27	9,9	27	880	5
1,169947	1,001587	1210	0,17	9,9	25	880	5
1,267197	1,036673	1250	0,15	9,9	26	880	5
0,8	0	1580	15,21	9,9	35	880	5
0,785263	0,747134	1510	19,18	9,9	35	880	5
0,880336	0,831062	1350	3,68	9,9	32	880	5

Продолжение таблица 3.2

0,976448	0,902332	1260	0,9	9,9	30	880	5
1,073732	0,957048	1180	0,38	9,9	27	880	5
1,170662	0,970783	1160	0,28	9,9	25	880	5
1,268275	0,966819	1220	0,3	9,9	26	880	5
1,365888	0,972778	1280	0,28	9,9	30	880	5
1,521067	0,921354	1450	0,27	9,9	30	880	5
0,720981	4,027321	1260	62,17	9,9	25	880	5
0,859775	6,013663	560	3,11	9,9	28	880	5
0,943224	6,210872	450	0,99	9,9	25	880	5
1,022441	6,363914	420	0,47	9,9	25	880	5
1,105671	6,421453	480	0,35	9,9	27	880	5
1,191057	6,494856	530	0,32	9,9	33	880	5
1,32346	6,256667	670	0,31	9,9	35	880	5
1,395227	6,482821	80	0,32	9,9	35	880	5
0,8	0	720	44,5	7,5	40	880	5
0,9	0	610	10,9	7,5	39	880	5
0,95	0	570	4,7	7,5	40	880	5
1	0	490	2,13	7,5	35	880	5
1,1	0	910	0,42	7,5	35	880	5
1,15	0	870	0,32	7,5	35	880	5
1,2	0	1040	0,3	7,5	35	880	5
1,25	0	1060	0,29	7,5	35	880	5
1,3	0	1600	0,28	7,5	38	880	5
0,9	0	560	16,3	7,5	35	880	5
1,35	0	1920	0,32	7,5	40	880	5
0,751006	2,4503078	1380	55	7,5	45	880	5
0,833283	3,0848963	700	19,45	7,5	40	880	5
0,914214	3,5738792	550	3,17	7,5	40	880	5
0,914214	3,5738792	550	3,17	7,5	40	880	5
1,000778	3,8266087	360	0,76	7,5	40	880	5
1,082878	3,9877496	350	0,27	7,5	38	880	5
1,174038	4,0647763	340	0,26	7,5	35	880	5
1,26382	3,9793709	360	0,24	7,5	35	880	5
1,413839	3,8763099	630	0,24	7,5	42	880	5
1,413839	3,8763099	630	0,24	7,5	42	880	5
0,829194	5,4906439	360	5	7,5	40	880	5
0,829194	5,4906439	360	5	7,5	40	880	5
0,861663	5,9012369	310	1,5	7,5	40	880	5
0,941222	6,183833	300	0,52	7,5	40	880	5
0,941222	6,183833	300	0,52	7,5	40	880	5
1,022441	6,2244796	240	0,34	7,5	40	880	5
1,022441	6,2244796	240	0,34	7,5	40	880	5
1,111983	6,1973228	350	0,31	7,5	42	880	5
1,111983	6,1973228	350	0,31	7,5	42	880	5
1,15669	6,1172556	400	0,31	7,5	42	880	5
1,15669	6,1172556	400	0,31	7,5	42	880	5
1,197364	6,1041117	410	0,32	7,5	42	880	5
0,991477	6,7650826	310	0,8	7,5	40	880	5

Результаты оценки токсичности по продуктам неполного сгорания при добавке водорода в бензовоздушную смесь с оценкой погрешности определения варьируемых параметров для двигателя ВАЗ-2111 приведена в таблице 3.2

Актуальность исследований процессов горения традиционных углеводородных топлив и альтернативных, с добавкой водорода, обусловлена глобальными политико-экономическими процессами, связанными с нефтяными ресурсами и экологическим состоянием окружающей среды. Исследования особенностей сгорания топливно-воздушной смеси (ТВС) при небольших добавках водорода, позволят лучше оценить положительное влияние водорода на процесс сгорания углеводородных топлив и способствовать его переходу от исследований к практическому применению.

На рисунках 3.1, 3.2 и 3.3 приведено сравнение влияния добавки водорода на равномерность процесса сгорания при работе двигателя ВАЗ-2111 на степени сжатия 9,9 в условиях углубокого дросселирования при составе смеси близком к стехиометрическому. Из представленных рисунков мы видим, что добавка водорода в размере 4% от массы топлива значительно снижает неравномерность и уменьшает количество пропусков зажигания, а в тоже время добавка уже 6% водорода практически полностью устраняет пропуски зажигания, как это проиллюстрировано на рисунке 3.4 и 3.5, где показано, что максимальное давление в цикле с пропуском зажигания без водорода больше, чем в цикле с долей водорода 6%, что говорит о большем количестве рабочей смеси в цилиндре двигателя. Следовательно для совершения той же работы при добавке водорода требуется значительно меньше топлива, что отражается не только на экономичности но и на снижении массовой токсичности автомобиля в целом, что немаловажно при оценки соответствия токсичности современным нормам ЕВРО 5 и 6.

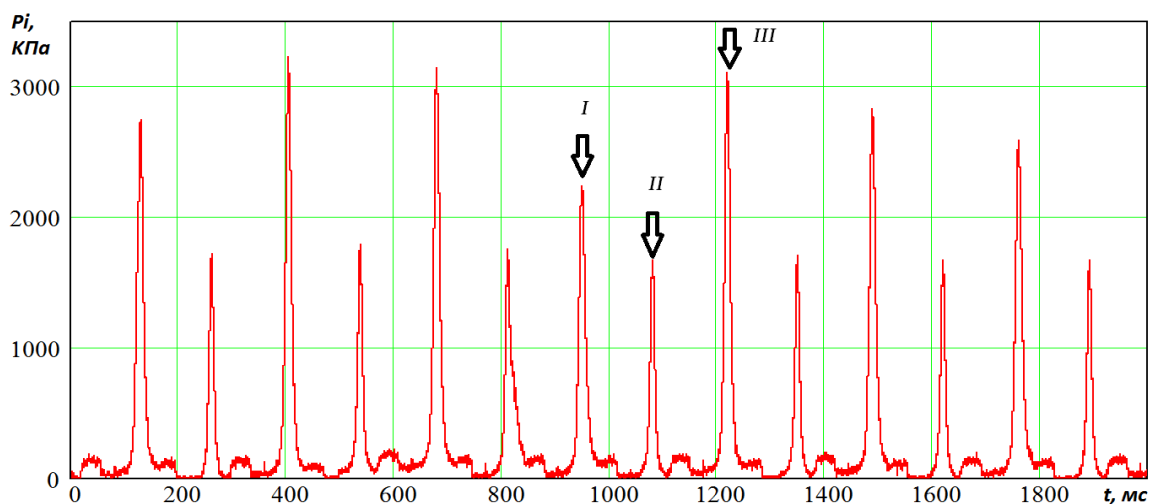


Рисунок 3.1 - Осциллограмма давления на режиме холостого хода при работе на бензине.

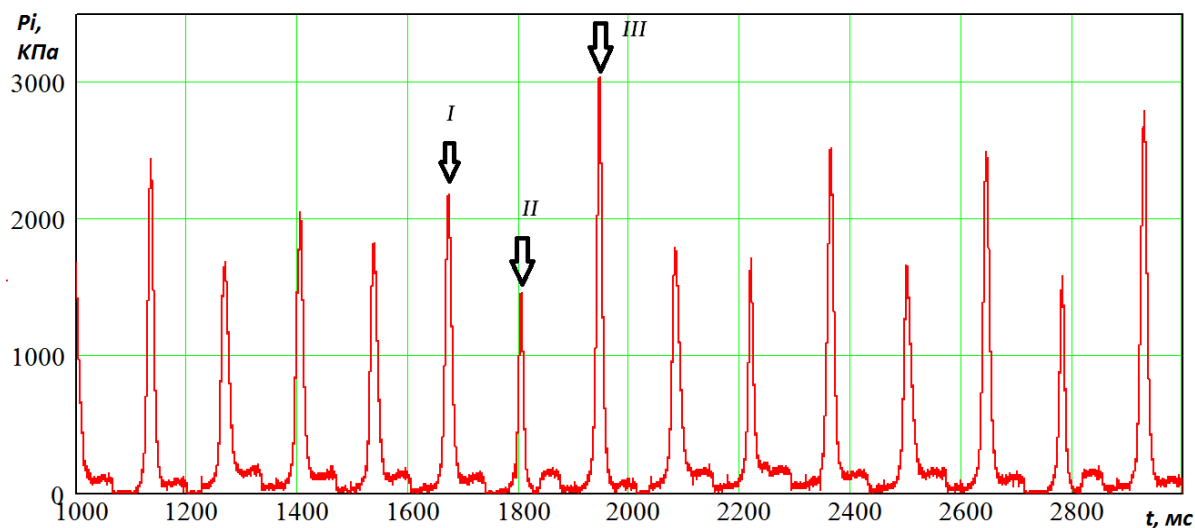


Рисунок 3.2 - Осциллограмма давления на режиме холостого хода при работе на бензине с добавкой 4% водорода.

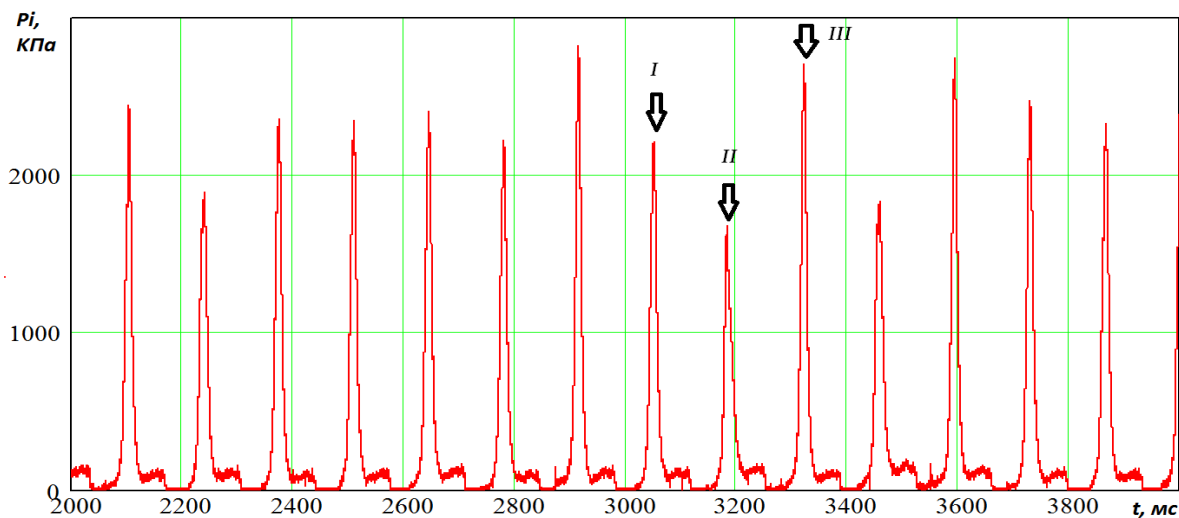


Рисунок 3.3 - Осциллограмма давления на режиме холостого хода при работе на бензине с добавкой 6% водорода.

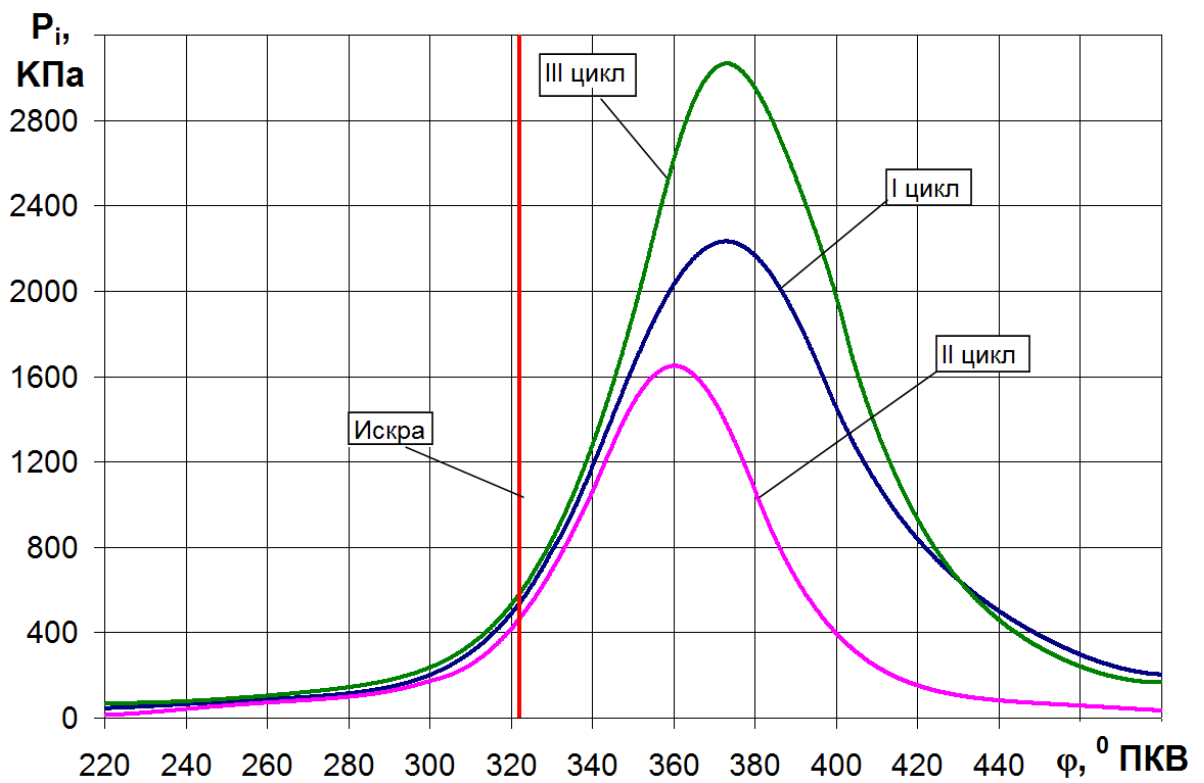


Рисунок 3.4 - Индикаторное давление на рассматриваемых циклах при работе на бензине.

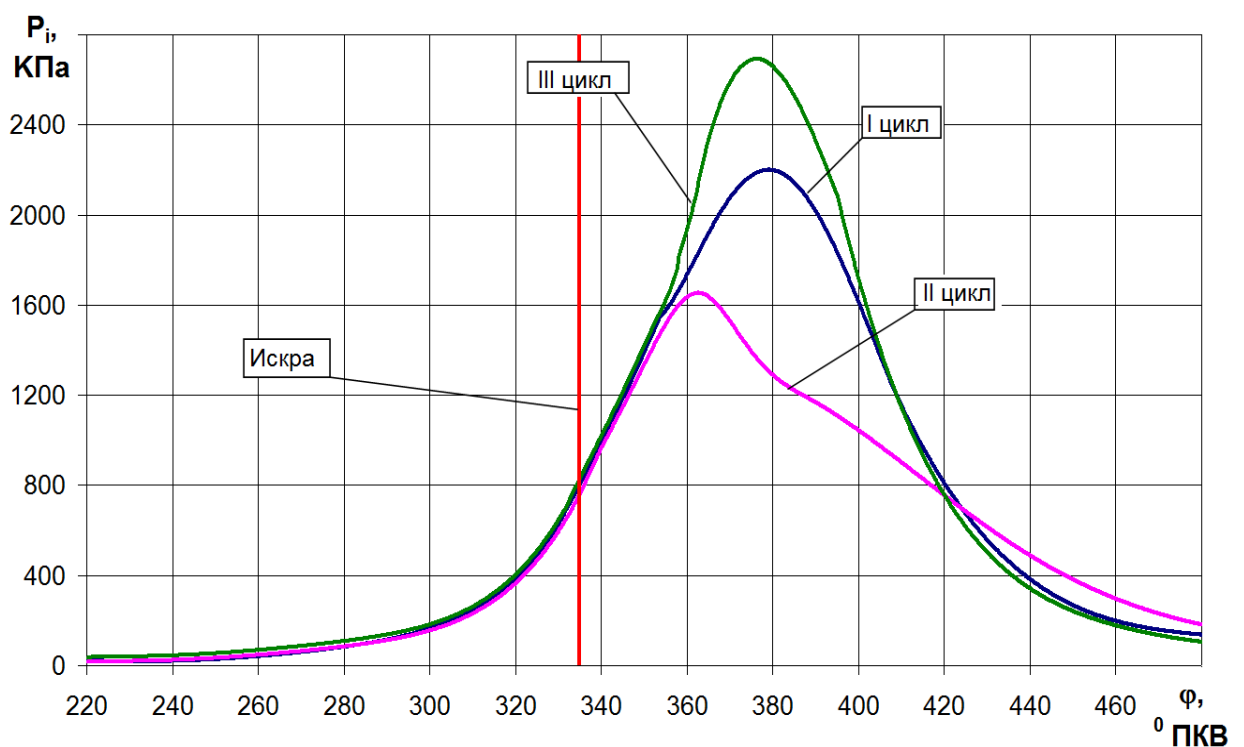


Рисунок 3.5 - Индикаторное давление на рассматриваемых циклах при работе на бензине с добавкой 6% водорода.

3.2 Влияние добавки водорода на концентрацию СН в ОГ

На рисунке 3.6 представлена зависимость концентрации СН в ОГ от состава смеси при работе бензине и при добавке в бензин 4 и 6% водорода, для двигателя ВАЗ-2111 со степенью сжатия 9,9 в режиме холостого хода (ХХ) при 880 об/мин и УОЗ=38, 34 и 30 град. ПКВ для бензина и бензина с добавкой 4 и 6% водорода соответственно. Из рисунка видно, на сколько значительно снижается токсичность по СН при добавке водорода в бензовоздушную смесь на режиме ХХ. При этом следует отметить широкий диапазон минимума по СН при добавке 6% водорода в бензовоздушную смесь, начиная от $\alpha = 1.1$ до $\alpha = 1.8$, что позволяет говорить о значительном влиянии водорода на устойчивость и качество протекания процесса сгорания на режимах ХХ при глубоком дросселировании, и соответственно на режимах частичных нагрузок

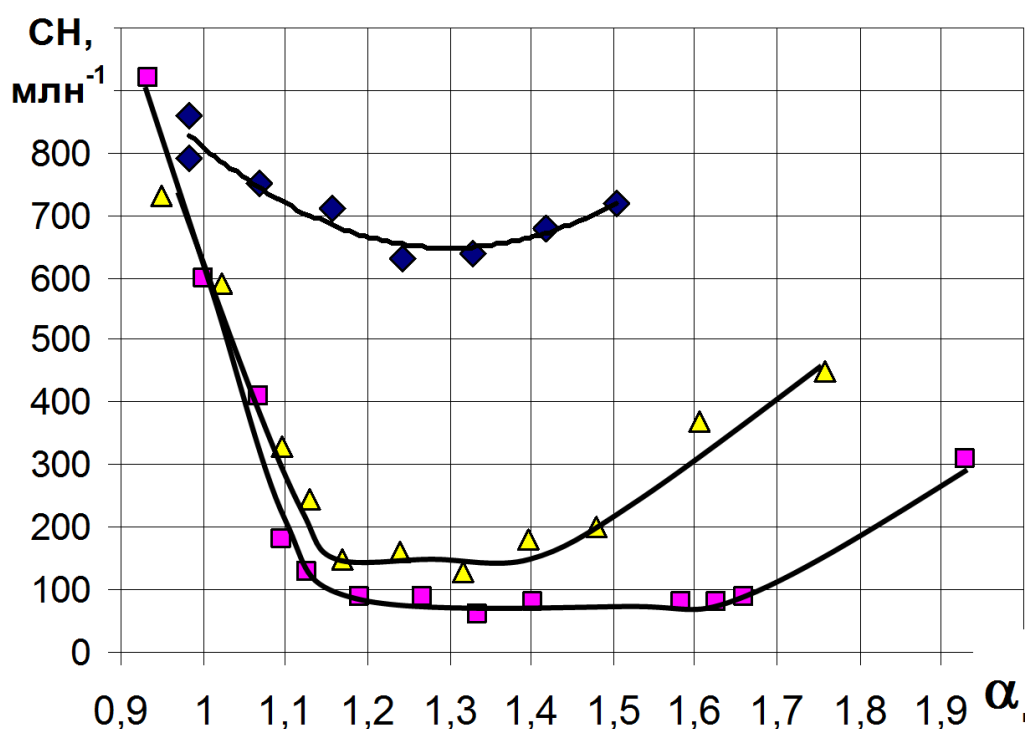


Рисунок 3.6 - Зависимости концентрации несгоревших углеводородов СН в отработавших газах двигателя ВАЗ-2111 при степени сжатия 9,9 на режиме ХХ от α при работе на бензине с долей водорода 0, 4 и 6%, при $n = 880$ мин⁻¹ и УОЗ - оптимальный по расходу бензина

На рисунке 3.7 представлена зависимости концентрации несгоревших углеводородов СН в отработавших газах двигателя ВАЗ-2111 на степени сжатия 7,5 на режиме ХХ от α при работе на бензине с долей водорода 0, 4 и 6%, при $n = 880 \text{ мин}^{-1}$ и УОЗ - оптимальный по расходу топлива. Полученные результаты по снижению концентрации углеводородов, в отработавших газах представленные на рисунке 3.7 показывают, что добавка водорода повышает стабильность и интенсивность протекания процесса сгорания. Уменьшение количества пропусков зажигания при работе на бензине с 6% водорода [2,3,9,10] обеспечивает в среднем снижение токсичности по углеводородам в два раза. При этом повышение концентрации углеводородов, в отработавших газах при обеднении смеси более $\alpha = 1.15$ объясняется ухудшением условий сгорания, приводящих к увеличению неравномерности циклов и количества пропусков зажигания пропорционально как для бензина так и для бензина с 6% водорода.

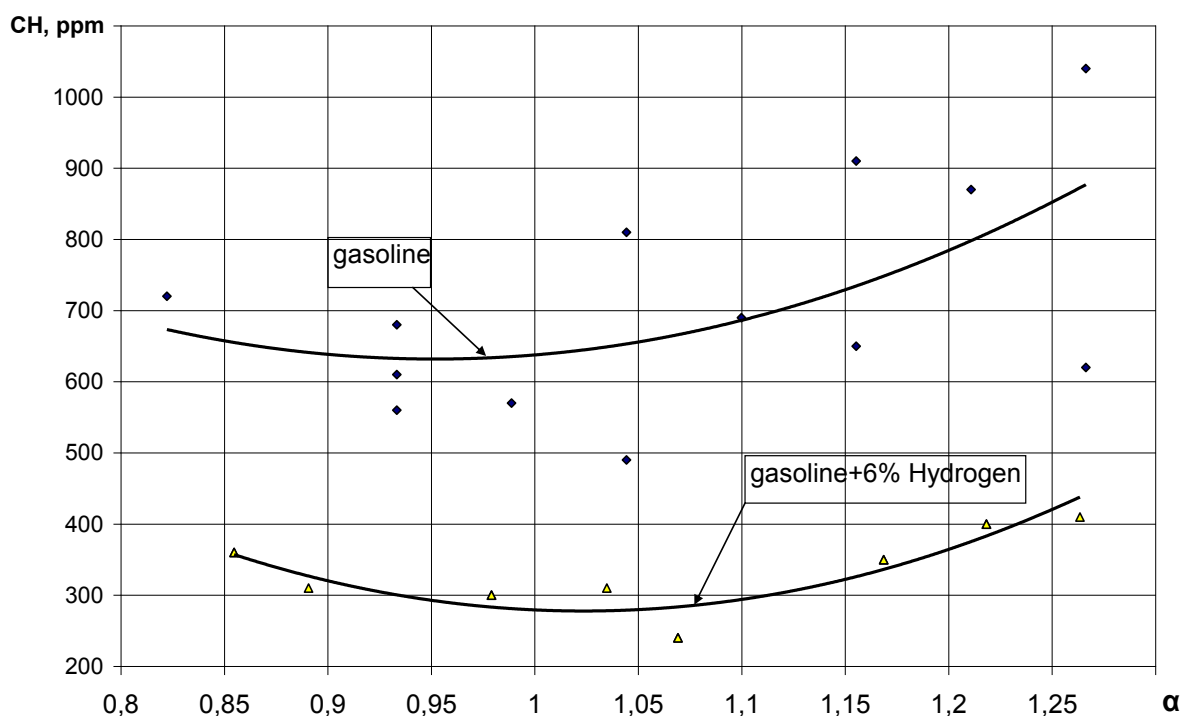


Рисунок 3.7 - Зависимости концентрации несгоревших углеводородов СН в отработавших газах двигателя ВАЗ-2111 на степени сжатия 7,5 на режиме ХХ от α при работе на бензине с долей водорода 0, 4 и 6%, при $n = 880 \text{ мин}^{-1}$ и УОЗ - оптимальный по расходу топлива

Рассматривая влияние добавки водорода на концентрации несгоревших углеводородов СН в отработавших газах для установки УИТ-85, можно отметить, что добавка водорода на режимах частичных нагрузок и стабильным сгоранием не столь значительно снижает токсичность по несгоревшим углеводородам, по сравнению с тем, какое влияние мы наблюдали для режимов глубокого дросселирования. Результаты экспериментальных исследований влияния изменения доли водорода в бензовоздушной смеси на концентрацию несгоревших углеводородов (СН), проведенные на установке УИТ-85 при степени сжатия $\epsilon = 7$, угле опережения зажигания $\text{УОЗ} = 13^\circ\text{ПКВ}$ и частоте вращения коленчатого вала $n = 900 \text{ мин}^{-1}$, представлены на рисунке 3.8.

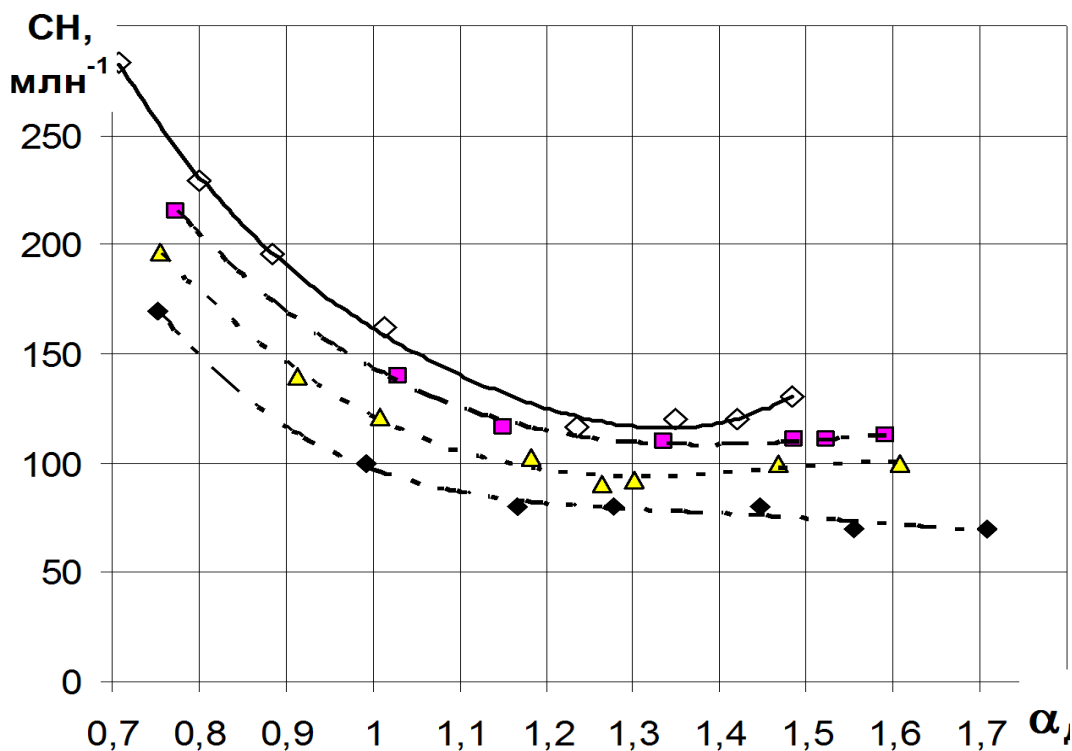


Рисунок 3.8 - Зависимость концентрации несгоревших углеводородов СН в отработавших газах для установки УИТ-85 от α при работе на бензовоздушной смеси с долей водорода 0, 5, 10 и 15%. Режим работы: $\text{УОЗ} = 13^\circ\text{ПКВ}$, $\epsilon = 7$; $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

Рассматривая влияние доли водорода в композитном топливе на концентрацию СН в отработавших газах, можно отметить значительное ее снижение во всем рассматриваемом диапазоне составов смеси примерно на $20\text{-}30 \text{ млн}^{-1}$

при увеличении доли водорода на каждые 5%, а также, что при работе на бензине в зоне $\alpha = 1.4$ наблюдается повышение выбросов СН, что говорит о наличии недогоревших СН за фронтом пламени и, следовательно, об ухудшении полноты сгорания, при этом с долей водорода 5, 10 и 15% такого эффекта не наблюдается.

На рисунке 3.9 приведена зависимость концентрации СН в ОГ от состава смеси при различных добавках водорода в бензовоздушную смесь для УИТ-85, показывающая снижение токсичности по СН при добавке водорода и смещение минимума по токсичности в область бедной смеси, так минимум для бензовоздушной смеси соответствует $\alpha=1,13$, при добавке 1%, 3% и 5% он смещается до $\alpha=1,155$, $\alpha=1,2$, $\alpha=1,25$ соответственно. Что говорит о повышении полноты сгорания при добавке водорода на бедных смесях.

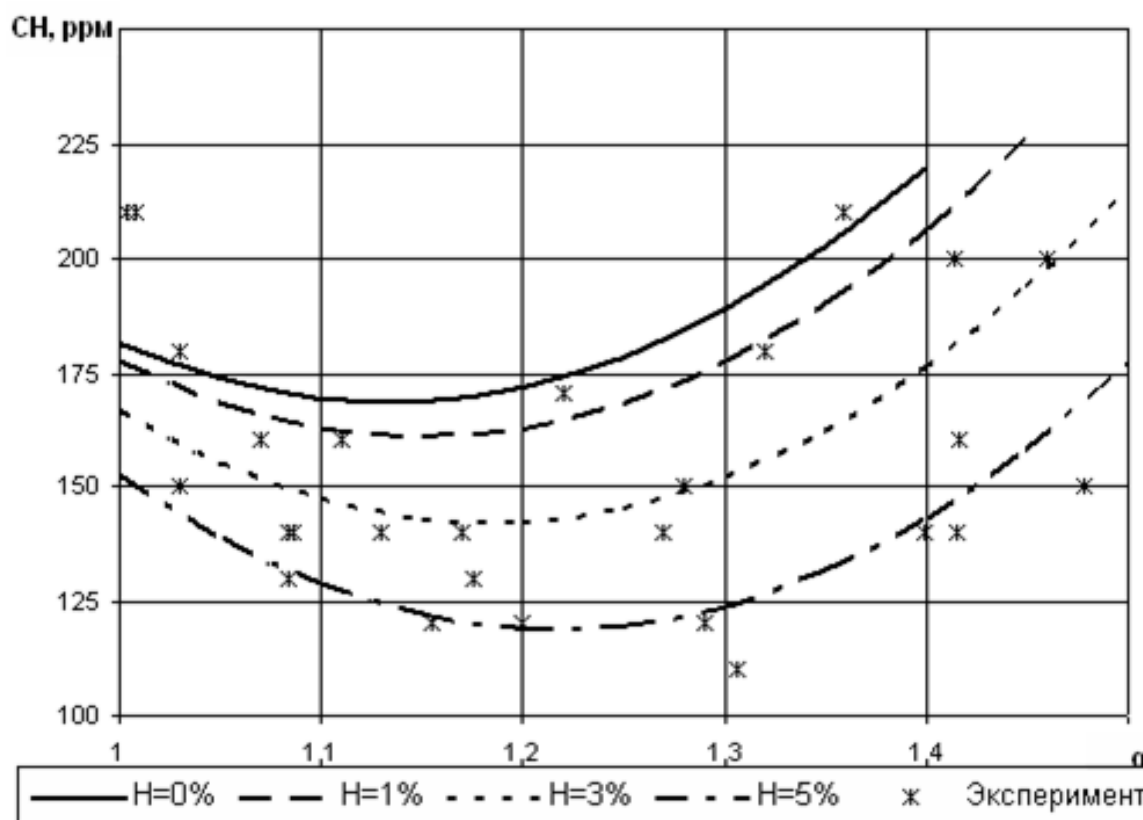


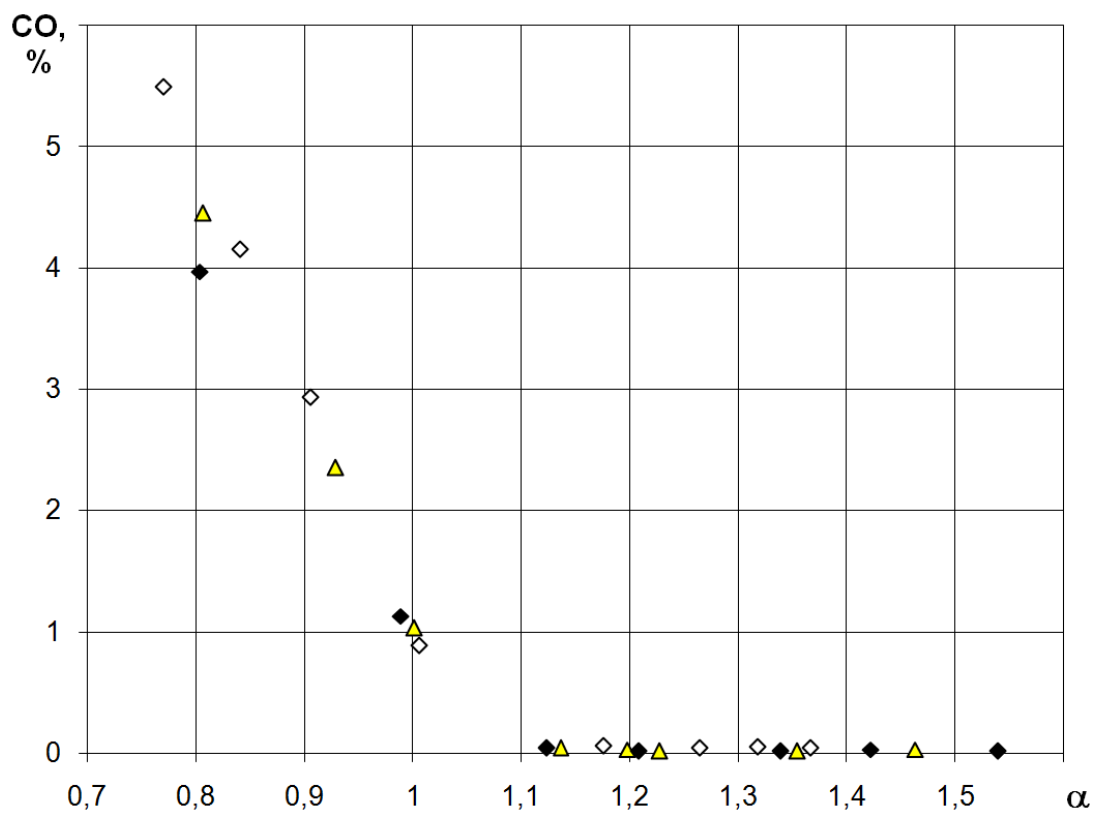
Рисунок 3.9 - Зависимость концентрации СН в ОГ от состава смеси при различных добавках водорода в бензовоздушную смесь для УИТ-85, режим работы $n=600$ 1/мин, $\text{УОЗ}=13^\circ$, $\epsilon=7$.

Увеличение угла опережения зажигания для скоростного режима 600 и 900 мин⁻¹ приводит к росту скорости распространения пламени, что свидетельствует о протекании процесса сгорания при меньшем объеме камеры сгорания и, как следствие, при более высокой температуре.

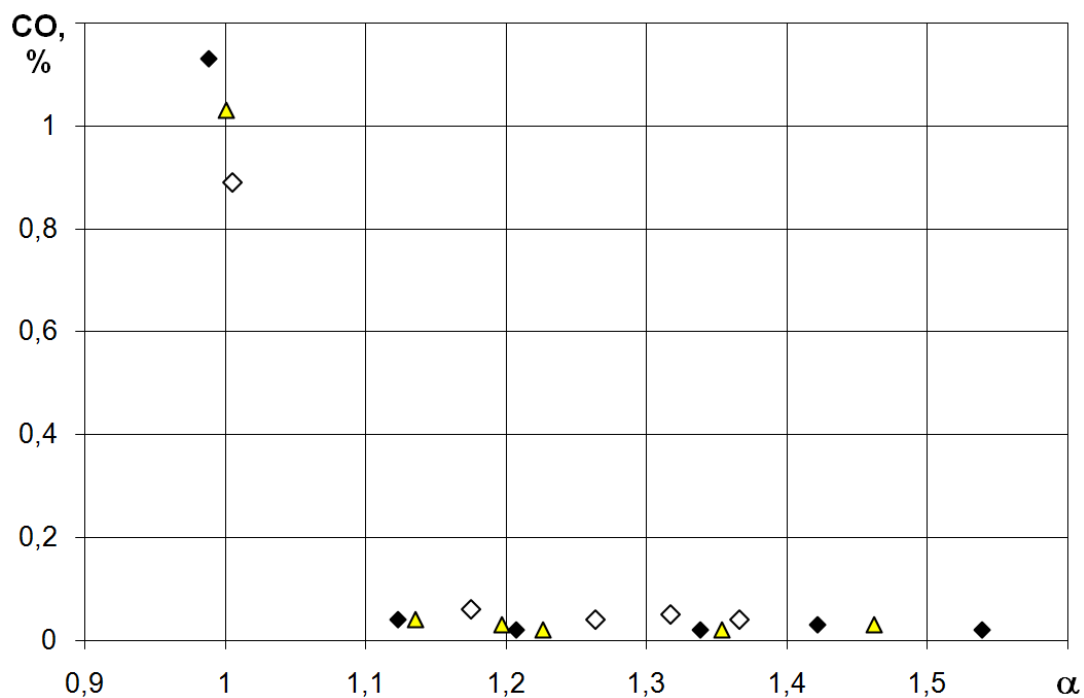
3.3 Влияние добавки водорода в на концентрацию угарного газа в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием

На рисунке 3.10 приведена зависимость концентрации СО в ОГ от состава смеси при различных добавках водорода в бензовоздушную смесь для УИТ-85, режим работы: 900 об/мин, УОЗ=13° ПКВ, показывающая снижение токсичности по СО при добавке водорода. Снижение токсичности по СО в ОГ при добавке 4 и 6% водорода в бензовоздушную смесь наблюдается на богатых (рисунок 3.10а) примерно на 5-7% и на бедных смесях (рисунок 3.10б) с 0,04 до 0,02%, по концентрации Со в отработавших газах, что составляет снижение на 50%, в то же время на стехиометрическом составе смеси добавка водорода не приводит к уменьшению токсичности по СО. Также установлено, что нет значительного различия в концентрации СО в ОГ при добавке 4 или 6% водорода.

Полученные результаты по снижению токсичности ОГ по несгоревшим углеводородам и угарному газу в области бедных смесей показывают, что добавка водорода повышает скорость распространения пламени и интенсивность протекания процесса сгорания. Интенсивность протекания процесса сгорания можно оценить по электропроводности пламени, т.к. основным источником ионного тока проводимости являются ионы углерода, а при добавке водорода происходит снижение концентрации атомов углерода в ТВС, следовательно, характеристика изменения ионного тока пламени позволит оценить изменение интенсивности протекания химических реакций во фронте пламени при добавке водорода.



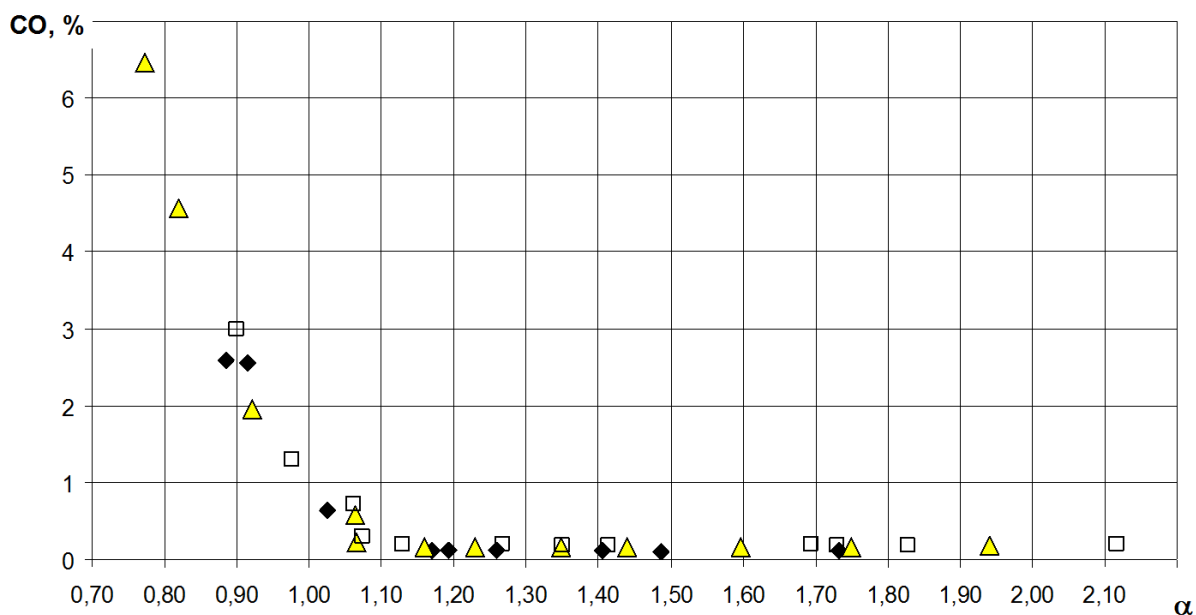
а)



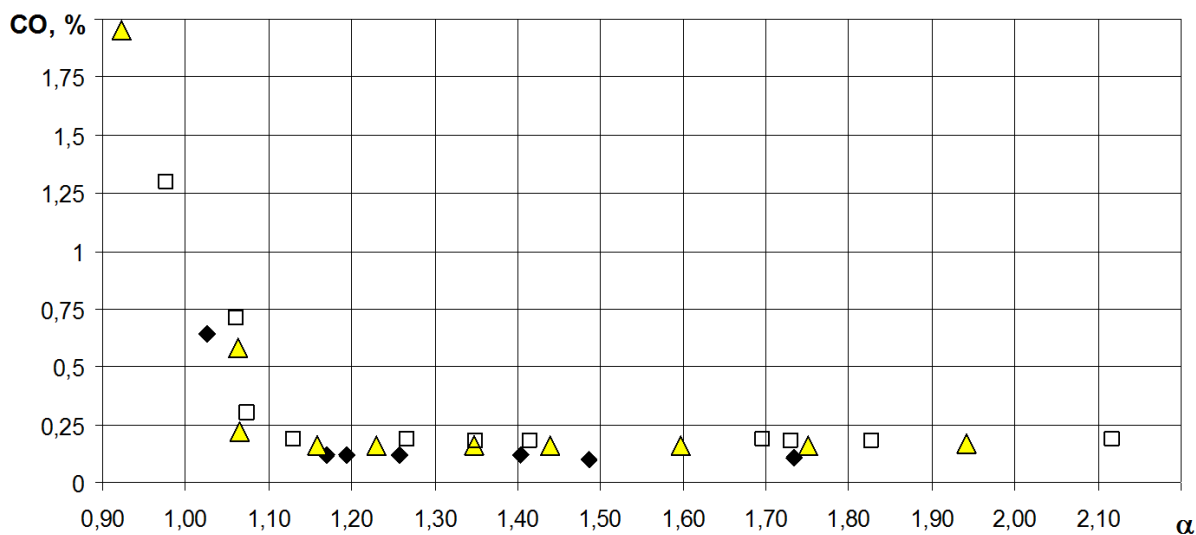
б)

Рисунок 3.10 - Зависимость концентрации СО в ОГ от состава смеси при различных добавках водорода в бензовоздушную смесь для УИТ-85, режим работы $n = 900$ 1/мин, $УОЗ = 13^\circ$, $\varepsilon = 7$: а) – во всем исследуемом диапазоне от $\alpha = 0.7$ до 1.6; б) – в диапазоне бедной смеси от $\alpha = 1.0$ до 1.6.

На рисунке 3.11 приведена зависимость концентрации СО в ОГ от состава смеси при работе на бензине и при добавке в бензовоздушную смесь 4 и 6% водорода, для двигателя ВАЗ-2111 в режиме холостого хода при 880 об/мин и $\text{УОЗ}=38, 34$ и 30 град. ПКВ для бензина и бензина с добавкой 4 и 6% водорода соответственно.



а)



б)

Рисунок 3.11 - Зависимость концентрации СО в ОГ от состава смеси при работе на бензине и при добавке 4 и 6% водорода, для двигателя ВАЗ-2111 в режиме ХХ при 880 об/мин, $\epsilon = 9,9$ и $\text{УОЗ}=38, 34$ и 30 град. ПКВ для бензина и при добавке 4 и 6% водорода соответственно: а) – в диапазоне от $\alpha = 0.7$ до 2.1; б) – в диапазоне бедной смеси от $\alpha = 1.0$ до 2.1.

Результаты экспериментально исследования показали что влияние добавки водорода в бензовоздушную смесь на токсичность по СО для двигателя ВАЗ-2111 схоже с результатами полученными на одноцилиндровой исследовательской установке УИТ-85.

Снижение токсичности по СО в ОГ при добавке 4 и 6% водорода в бензовоздушную смесь наблюдается на богатых (рисунок 3.11а) примерно на 7-10% и на бедных смесях (рисунок 3.11б) с 0.02 до 0.01%, что составляет снижение на 50%, в то же время на стехиометрическом составе смеси добавка водорода не приводит к уменьшению токсичности по СО. Также установлено, что нет значительного различия в концентрации СО в ОГ при добавке 4 или 6% водорода.

Проведённые исследования позволяют расширить понимание влияния добавки водорода в бензовоздушную смесь на токсичность ДВС, по несгоревшим углеводородам и угарному газу. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования процесса сгорания при разработке новых способов организации рабочего процесса ДВС, при работе на альтернативном топливе безин с добавкой водорода.

Добавка водорода в бензовоздушную смесь снижает токсичность по СН при полностью открытом дросселе на 15-25%, а на режиме ХХ на 50-60%. При этом минимум по токсичности смещается в область бедных смесей при полностью открытом дросселе на УИТ-85 до $\alpha = 1.38$, а на режиме ХХ ВАЗ-2111 до $\alpha = 1.8$.

Также добавка водорода в бензовоздушную смесь снижает токсичность по СО на бедных смесях на 50%, при этом снижение токсичности в области богатых и стехиометрических смесей незначительно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты работы могут быть представлены следующими выводами:

1. Добавка водорода в бензовоздушную смесь снижает токсичность по СН при полностью открытом дросселе на 15-25%, а на режиме ХХ на 50-60%. При этом минимум по токсичности смещается в область бедных смесей при полностью открытом дросселе на УИТ-85 до $\alpha = 1,38$, а на режиме ХХ ВАЗ-2111 до $\alpha = 1,8$.

2. Также добавка водорода в бензовоздушную смесь снижает токсичность по СО на бедных смесях на 50%, при этом снижение токсичности в области богатых и стехиометрических смесей незначительно.

3. Показано снижение концентрации углеводородов, в отработавших газах примерно в два раза за счет применения добавки водорода снижается количество пропусков зажигания и увеличивается равномерность циклов на режиме холостого хода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лютко, В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В. Н. Луканин, А. С. Хачиян. - М.: МАДИ (ТУ), 2000
2. Новиков, Л.Н. Современные и перспективные технологии для организации малотоксичной работы двигателей / Л. Н. Новиков // Двигателестроение. - 2005. - №222. - С. 8-15.
3. Кульчицкий, А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 651200 "Энергомашиностроение" специальности 101200 "Двигатели внутр. сгорания" / А. Р. Кульчицкий. - М.: Акад. проект, 2004. - 398 с.
4. Mustafi, N.N. Spark-ignition engine performs with «Power-gas» fuel (mixture of CO/H₂): A comparison with gasoline and natural gas / N. N. Mustafi [и др.] 2006
5. Verhelst, S. A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines: PhD thesis / S. Verhelst. - Gent: Gent University, 2005
6. Sebastien, E. Investigation of hydrogen carriers for fuel-cell based transportation / E. Sebastien [и др.] // SAE, 2002-01-0097. - 2002. - №1
7. Suwanchotchoung, N. Performance of a spark ignition dual-fueled engine using split-injection timing: Ph.D. Thesis / N. Suwanchotchoung. - Vanderbilt University, 2003.
8. Changwei, J.I. Experimental study on combustion and emissions characteristics of a spark ignition engine blended with hydrogen / J. I. Changwei // SAE. - 2009. - №2009-01-1923. - С. 132-154
9. Kamenev, V.F. Scientific bases and ways to improve the toxic characteristics of automobile engines with spark ignition: Diss. . dokt.tehn.nauk: 05.04.02 NAMI / Kamenev Vladimir Fedorovich. - Moscow, 1996. - 454 p.
10. Gortyshov, Y.F., Gureev, V.M., Misbakhov, R.S., Gumerov, I.F., Shaikin, A.P. Influence of fuel hydrogen additives on the characteristics of a gas-

- piston engine under changes of an ignition advance angle (2009) *Russian Aeronautics*, 52 (4), pp. 488-490. Information on <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-76449108200&partnerID=40&md5=7d22fcb28bdacfaced914ef05922e463>
DOI: 10.3103/S1068799809040199
11. Bortnikov, L.N., Pavlov, D.A., Rusakov, M.M., Shaikin, A.P. The composition of combustion products formed from gasoline-hydrogen-air mixtures in a constant-volume spherical chamber (2011) *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 5 (1), pp. 75-83. Information on <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79956326816&partnerID=40&md5=8010b46bf50435298d67999d72a65398>
DOI: 10.1134/S1990793111010039
 12. Nemati, A., Fathi, V., Barzegar, R., Khalilarya, S. Numerical investigation of the effect of injection timing under various equivalence ratios on energy and exergy terms in a direct injection SI hydrogen fueled engine (2013) *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (2), pp. 1189-1199. Cited 8 times. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.10.083
 13. Teh, K.-Y., Miller, S.L., Edwards, C.F. Thermodynamic requirements for maximum internal combustion engine cycle efficiency. Part 1: Optimal combustion strategy (2008) *International Journal of Engine Research*, 9 (6), pp. 449-465. Information on <http://journals.pepublishing.com/content/b5006q7622250524/fulltext.pdf?tvn6-hte7-mwt4&returnUrl=> doi: 10.1243/14680874JER01508
 14. Chintala, V., Subramanian, K.A. Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis (2014) *Energy*, 67, pp. 162-175. Information on www.elsevier.com/inca/publications/store/4/8/3/ doi: 10.1016/j.energy.2014.01.094

15. Li, Y., Jia, M., Chang, Y., Kokjohn, S.L., Reitz, R.D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes (2016) *Applied Energy* 180, pp. 849-858
16. Zhao, Z., Wang, S., Zhang, S., Zhang, F. Thermodynamic and energy saving benefits of hydraulic free-piston engines (2016) *Energy* 102, pp. 650-659
17. Shaikin, A.P., Galiev, I.R. On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings (2016) *Technical Physics*, 61 (8), pp. 1206-1208. Information on <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84981489611&partnerID=40&md5=2a171a70052f225423d5f1082d29a746> DOI: 10.1134/S1063784216080247
18. Wang, B., Wang, Z., Shuai, S., Xu, H. Combustion and emission characteristics of Multiple Premixed Compression Ignition (MPCI) mode fuelled with different low octane gasolines (2015) *Applied Energy*, 160, pp. 769-776. Information on <http://www.elsevier.com/inca/publications/store/4/0/5/8/9/1/index.htm> doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.115
19. Jehad, A.A. The effect of combustion duration on the performance and emission characteristics of propane fueled 4-stroke S.I. engines / A. A. Jehad, H. N. Gupta, B. B. Bansal // *SAE*, 1232708. - 2003.
20. Das, L.M. Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application / L. M. Das // *International Journal of Hydrogen Energy*. - 2002. - №27. - C. 479-487
21. Ghazi, A. K. Hydrogen as a spark ignition engine fuel / A. K. Ghazi // *International Journal of Hydrogen Energy*. - 2003. - №28. - C. 569-577
22. Hailin, L. Exhaust emissions from an SI engine operating on gaseous fuel mixtures containing hydrogen / L. Hailin, G. A. Karim // *International Journal of Hydrogen Energy* -2005. - №30. - C. 1491-1499

23. Berger, E. The new BMW 12-cylinder hydrogen engine as clean efficient and powerful vehicle power train / E. Berger [и др.] // Paper presented at the Fisita 2006 World Congress, F2006P114, Yokohama. - 2006. - С. 114
24. Rottengruber, H. Potentials of a charged si-hydrogen engine / H. Rottengruber, M. Berckmuller // SAE. - 2003. - №2003-01-3210.
25. Nande, A. Influence of water injection on performance and emissions of a direct-injection hydrogen research engine / A. Nande, T. Wallner, J. D. Naber // SAE. - 2008. - №2008-01-2377
26. Stockhausen, W.F. Ford P2000 hydrogen engine design and vehicle development program / W. F. Stockhausen // SAE. - 2002. - №2002-01-0240.
27. Quader, A.A. Engine performance and emissions near the dilute limit with hydrogen enrichment using an on-board reforming strategy / A.A. Quader, E.J. Kirwan, G.E. James // SAE. - 2003. - №2003-01-1356
28. Gadallah, A.H. Effect of in cylinder water injection strategies on performance and emissions of a hydrogen fuelled direct injection engine / A. H. Gadallah // SAE. - 2009. - №2009-01-1925
29. Ивашин, П.В. Электропроводность пламени и средняя скорость сгорания в заключительной фазе / П. В. Ивашин, Т. А. Прокопович, А. П. Шайкин, В. И. Строганов // Наука производству. - 2004. - №4. - С. 5-7.
30. Wilson, T.S. High bandwidth heat transfer and optical measurements in an instrumented spark ignition internal combustion engine / T. S. Wilson [и др.] // SAE. - 2002. - №2002-01-0747
31. Andersson, I. Cylinder pressure and ionization current modeling for spark ignited engines / I. Andersson: Linkopings Universitet, 2002
32. Collier, T.R. Measurement of gasoline exhaust hydrogen emissions / T. R. Collier [и др.] // SAE. - 2004. - №2004-01-0592.
33. Будаев, С.И. Ионный ток в пламени и скорость сгорания топливно-воздушной смеси в двигателе с искровым зажиганием / С. И. Будаев, П. В. Ивашин, В. В. Смоленский, А. П. Шайкин // Современные тенден-

- ции развития автомобилестроения в России. Материалы 3-й ВНТК 26-28 мая. - 2004. - С. 107-112
34. Смоленский, В.В., Дягилева Н.М. Влияние физических параметров топливно-воздушной смеси в момент воспламенения на скорость распространения пламени в основной фазе сгорания // Материалы МНК «Ломоносов», 12-15 апреля 2006, МГУ. – М., 2006. – С.97-99
35. Ивашин П.В., Коломиец П.В., Смоленский В.В., Шайкин А.П. Взаимосвязь электропроводности пламени и показателя сгорания в бензиновых двигателях // 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
36. Ахремочкин О.А., Гордеев В.Н., Коломиец П.В., Тофан П.П.. Определение средней турбулентной скорости сгорания в цилиндре ДВС. // Материалы ВНТК "Технический ВУЗ - наука, образование и производство в регионе" ч.2 - Тольятти, 2001.
37. Auzins, J. Ion-gap sense in misfire detection, knock end engine control / J. Auzins, H. Johansson, J. Nytomt // SAE. - 1998. - №950004