

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование)

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

Энергетические комплексы и системы управления
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Оценка эффективности применения добавки водорода для
активации процесса сгорания в бензиновых ДВС

Студент Амирбек Табрезович Зикиллобеков (личная подпись)
(И.О. Фамилия)

Научный к.т.н., доцент, В.В. Смоленский
руководитель (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Изучение литературы для выявления и оценке эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС	7
1.1 Обзор результатов, представленных в диссертации Р.Ш. Мисбахова	7
1.2 Обзор результатов, представленных в диссертации Д. А. Павлова	8
1.3 Обзор результатов, представленных в диссертации Ю.В. Галышева	10
1.4 Обзор результатов, представленных в диссертации Г. Б. Талда	11
1.5 Обзор результатов, представленных в диссертации В. В. Румянцева	13
1.6 Обзор результатов, представленных в монографии Л. Н. Бортникова	15
1.7 Выводы по Главе 1 «Изучение литературы для выявления и оценке эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС».....	22
Глава 2 Описание экспериментального оборудования	23
2.1 Экспериментальные стенды	23
2.2 Методика поведения эксперимента.....	26
2.3 Определение продолжительности процесса сгорания по изменению показателя политропы в ДВС с искровым зажиганием	28
2.4 Выводы по главе 2 «Описание экспериментального	

оборудования»	32
Глава 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС	33
3.1 Результаты экспериментальных исследований, проводимых на установке УИТ-85.....	33
3.2 Результаты экспериментальных исследований проводимых на двигателе ВАЗ-2111.....	37
3.3 Выводы по главе 3 «Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС»	42
Глава 4 Выявление возможностей повышения эффективности бензинового ДВС за счет добавки водорода для активации процесса сгорания	43
4.1 Анализ эффективности бензинового ДВС при активации процесса сгорания добавками водорода на примере установки УИТ-85.....	43
4.2 Анализ эффективности бензинового ДВС при активации процесса сгорания добавками водорода на примере ВАЗ-2111 ..	48
4.3 Выявление возможностей повышения эффективности бензинового ДВС за счет добавки водорода для активации процесса сгорания.....	54
4.4 Выводы по главе 4 «Выявление возможностей повышения эффективности бензинового ДВС за счет добавки водорода для активации процесса сгорания»	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	59
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	62

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы и научная значимость настоящего исследования.

Повышение показателей поршневых ДВС всегда являлось и является важнейшим направлением развития двигателестроения. Особую значимость данный вопрос имеет для двигателей автомобилей, работающих большей частью времени на режимах частичных и переменных нагрузок, которые характеризуются низкими значениями коэффициента полезного действия.

Традиционный подход к проектированию ДВС основан на методиках расчетов показателей при применении стандартных топлив, имеющих постоянный химический состав с четко определёнными физическими свойствами, на номинальном режиме. Вместе с тем, результаты исследований, выполненных разными авторами, позволили установить, что как водород, так и его добавки к бензину наиболее эффективны при применении на дроссельных режимах, характерных условиям эксплуатации автомобильных двигателей в городском режиме движения [19, 57]. При этом разным режимам наибольшему эффекту соответствует конкретная смесь бензина с водородом, т.е. задача сводится к обеспечению работы двигателя на топливе переменного состава.

Таким образом, анализ вопросов, связанных с рассматриваемой проблемой, позволяет сделать в настоящее время вывод об её актуальности и целесообразности постановки исследований по изучению, как процессов горения смесей углеводородного топлива с водородом, так и применения их в автомобильных ДВС, в частности, при работе на режимах частичных нагрузок, характерных для эксплуатации автомобилей в городских условиях.

Оценка эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС при современном развитии двигателестроения показывает актуальность данной работы.

Объект исследования: бензиновый двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием.

Предмет исследования: влияние добавки водорода в бензиновом ДВС на процесс сгорания и его характеристики.

Целью работы является оценка эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС.

Гипотеза исследования состоит в том, что водород, является одним из самых горючих газов, с высокими характеристиками диффузии, за счет этого он признан как эффективная добавка к основному углеводородному топливу позволяющая значительно интенсифицировать процесс горения.

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

1. провести оценку наличия эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС
2. выявить возможности повышения эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС с активацией процесса сгорания добавками водорода.

Методы исследования: метод экспериментального исследования, метод статистической обработки результатов эксперимента.

Научная новизна исследования заключается в выявление особенностей влияния добавки водорода на термодинамические характеристики рабочего процесса в бензиновом ДВС с искровым зажиганием.

Личное участие автора в организации и проведении исследования состоит в том, что автор принимал непосредственное участие в формировании аналитического обзора по направлению исследований, а также в анализе экспериментальных данных и полученных на основании анализа практических рекомендаций и выводов.

Апробация и внедрение результатов работы велись в течении всего исследования. Его результаты докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» в 2019 и 2020 г.
- на международной научно-практической конференции: «Актуальные вопросы образования и науки» (Тамбов, 30 апреля 2020 г.).
- опубликована научная статья: Определение продолжительности процесса сгорания по изменению показателя политропы в ДВС с искровым зажиганием // Научный альманах. 2020. №4-1 (66). С. 72-76. Объем статьи 0,31 усл. печ. л.

На защиту выносятся:

- выявленные возможности повышения эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС за счет применения добавки водорода.

Структура магистерской диссертации. Диссертации состоит из введения, 4 глав, заключения с основными результатами и выводами, содержит 53 рисунков, 0 таблиц, списка использованных источников (77 источников). Основной текст изложен на 70 страницах.

ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС

1.1 Обзор результатов, представленных в диссертации Р.Ш. Мисбахова

Исследования проведенные Мисбаховым Р.Ш. показали эффективность применения водорода в качестве добавки активирующей процесс сгорания газового двигателя КамАЗ-820.52-260 (КАМАЗ - 820.53-260). Основной объем добавляемого водорода $H_2 = 0,2 - 0,5$ кг/ч. На рисунке 1.1 представлен результат исследования регулировочная характеристика по составу смеси на режиме холостого хода при $n = 800$ мин⁻¹, УОЗ = 10 ° ПКВ. Из рисунка мы видим, что добавка водорода снижает расход воздуха и количество отработавших газов. Снижение расхода воздуха при сохранении мощностных показателей говорит о повышении эффективности протекания процесса сгорания при добавке водорода в ТВС.

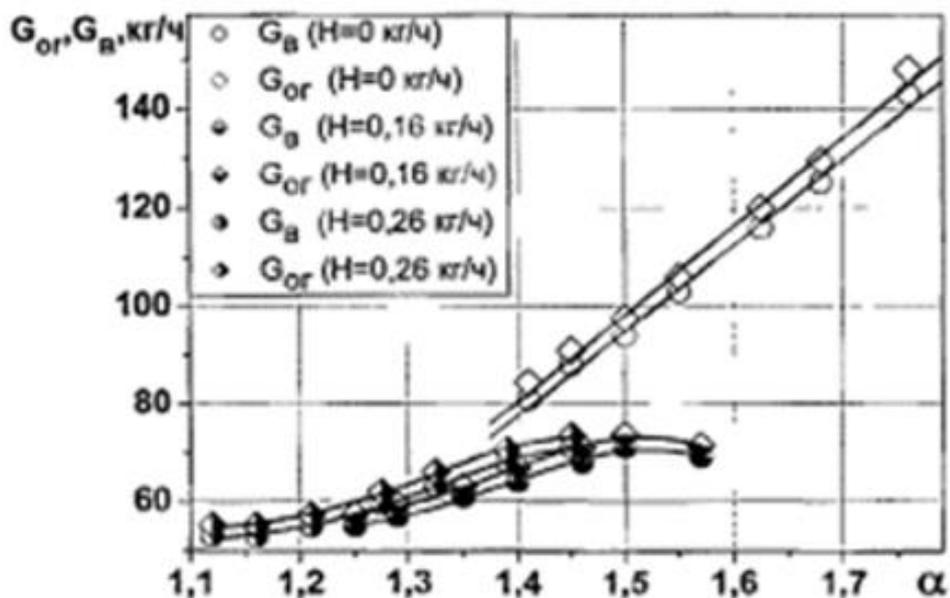


Рисунок 1.1 – Регулировочная характеристика по составу смеси на режиме холостого хода при $n = 800$ мин⁻¹, УОЗ = 10 ° ПКВ

На рисунке 1.2, представлена характеристика расхода природного газа на режиме холостого хода при добавке водорода в ТВС. Видно значительное снижение расхода (до 35%) при добавке 0,16 и 0,26 кг/ч водорода. Также следует отметить практически отсутствующее различие в расходе природного газа при добавке 0,16 и 0,26 кг/ч водорода, что говорит об эффективности применения именно малых добавок водорода и в данном случае увеличение количества водорода с 0,16 до 0,26 экономически не оправдано.

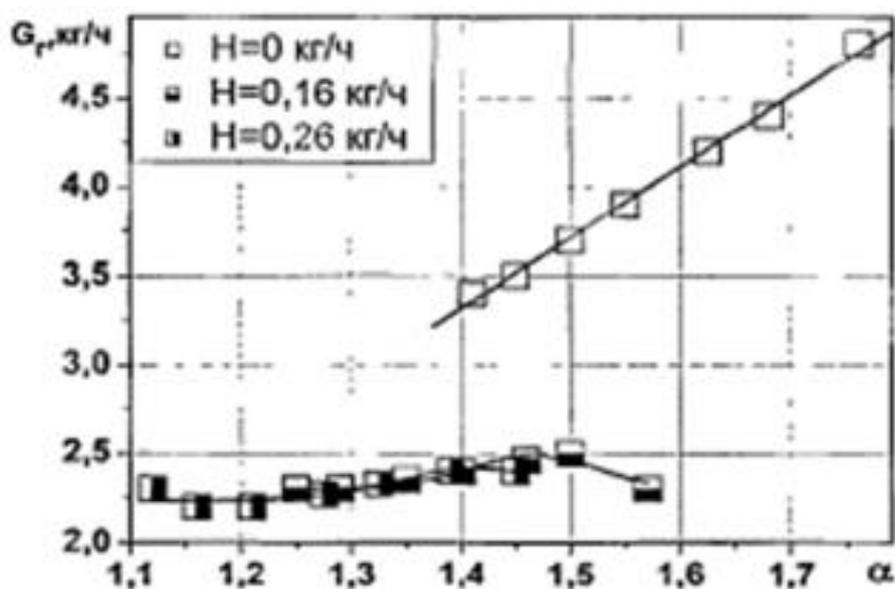


Рисунок 1.2 – Характеристика расхода природного газа на режиме холостого хода при добавке водорода в ТВС при $n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $\text{УОЗ} = 10^\circ \text{ ПКВ}$

1.2 Обзор результатов, представленных в диссертации Д. А. Павлова

В диссертации Павлова Д. А. показано влияние водорода на условия работы двигателя ВАЗ с электронной системой управления выполняющего нормы токсичности ЕВРО-2. Одной из проблем двигателя ВАЗ была высокая токсичность по несгоревшим углеводородам на режиме пуска и прогрева двигателя. В работе предложено применять в течении пуска и прогрева небольшую добавку водорода 0,04 кг/ч, которую возможно получать при

помощи электролиза или рекуперации отработавших газов во время стоянки автомобиля в пробке, за счет оборудования размещенного в багажном отделе.

На рисунке 1.3 показаны характеристики токсичности по продуктам неполного сгорания на режиме пуска и прогрева. Этот режим занимает первые 250 с от момента первого зажигания.

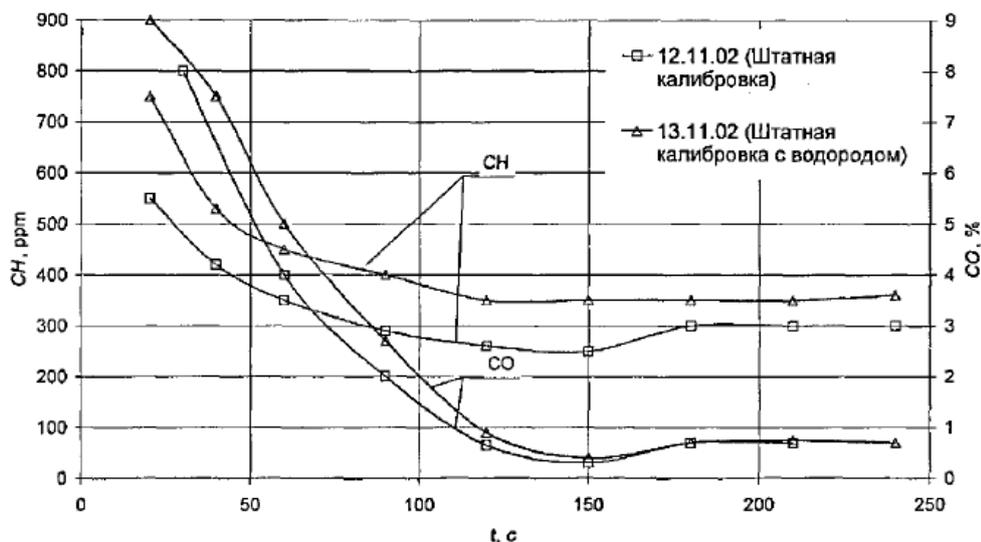
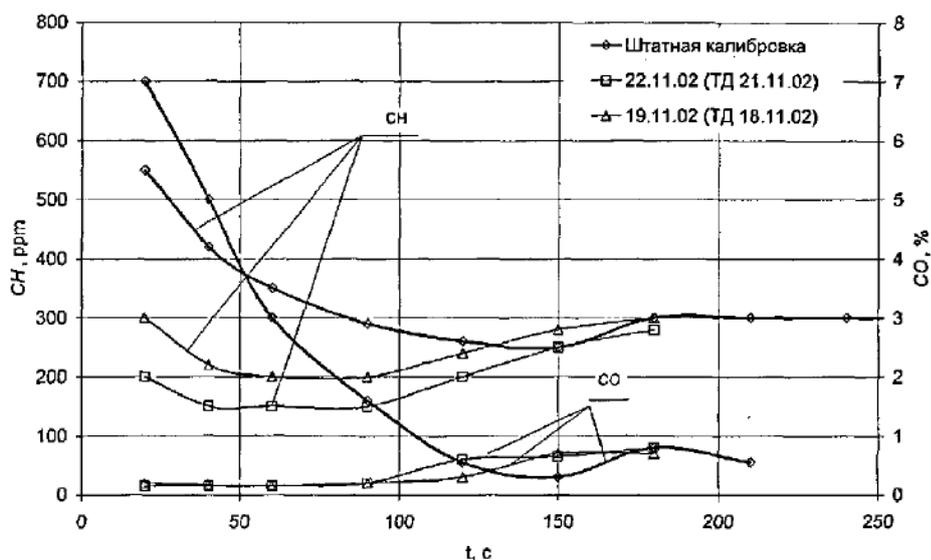


Рисунок 1.3 – Характеристики токсичности по продуктам неполного сгорания на режиме пуска и прогрева при штатных калибровках контроллера



Рисунке 1.4 - Характеристики токсичности по продуктам неполного сгорания на режиме пуска и прогрева при добавке 0,04 кг/ч водорода и применению разработанных калибровок контроллера

Полученные на рисунках 1.3 и 1.4 данные говорят об эффективности применения добавки водорода на режиме пуска и прогрева, так добавка 0,04 кг/ч позволила снизить массовые выбросы СН практически в 2 раза.

1.3 Обзор результатов, представленных в диссертации Ю.В. Галышева

В работе Галышева Ю. В. показано, что водород в будущем может стать экологически чистым возобновляемым источником энергии для транспортных средств. Основным результатом, иллюстрирующим эффективность применения водорода являются испытания по изменению нагрузки, проведенные на двигателе ЗМЗ-24Д при $n=2500 \text{ мин}^{-1}$ (рисунок 1.5).

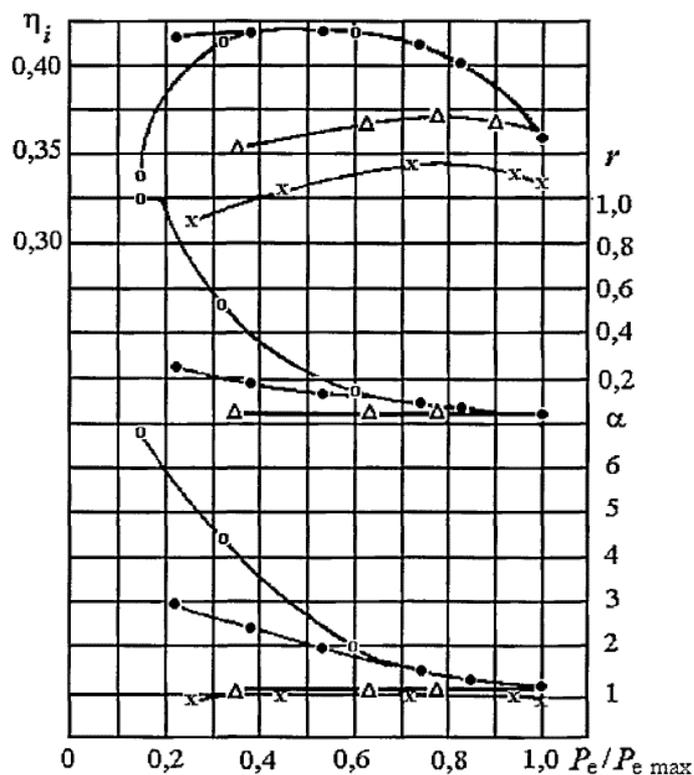


Рисунок 1.5 – Испытания по изменению нагрузки, проведенные на двигателе ЗМЗ-24Д при $n=2500 \text{ мин}^{-1}$:

--x--x-- при работе на бензине; при работе на бензине с добавкой водорода:

--Δ--Δ-- количественное регулирование; --o--o--качественное --•-•-•-

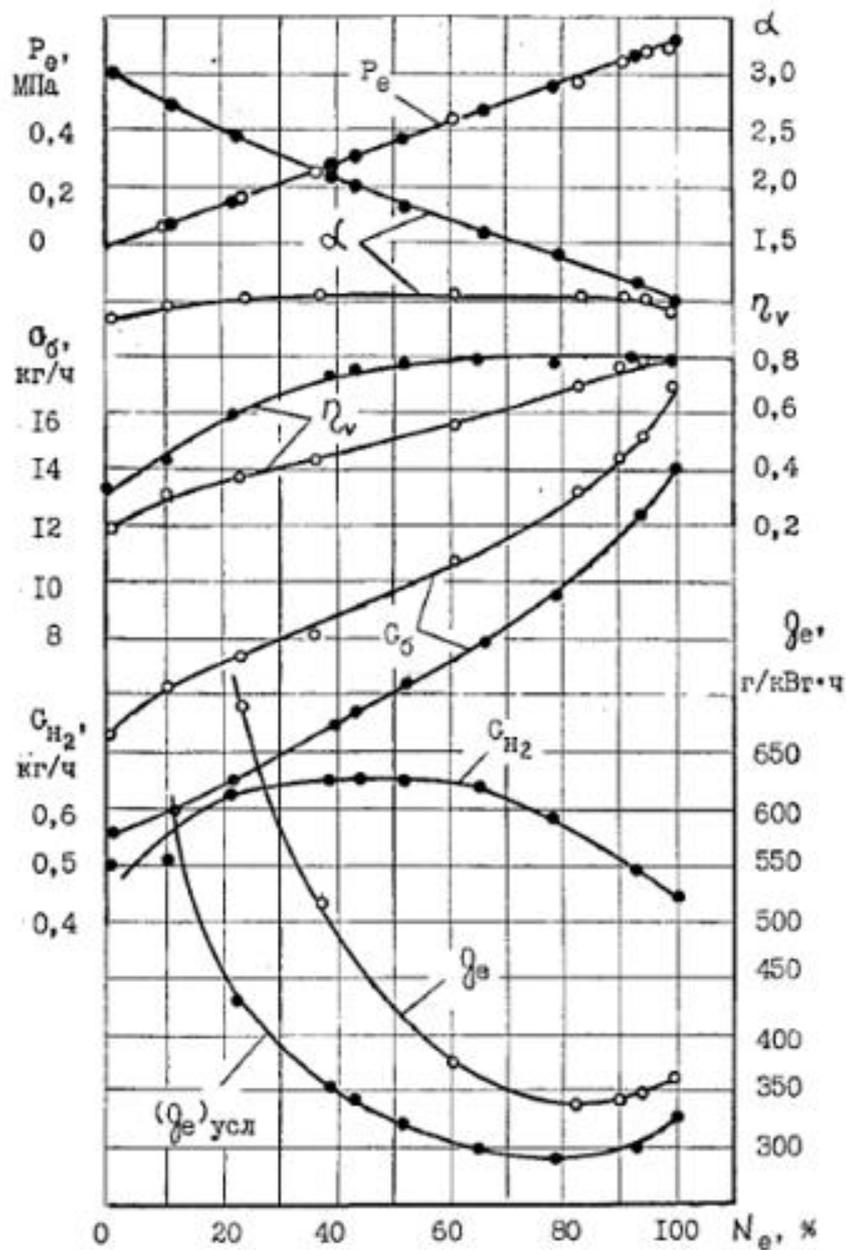
смешанное

Из рисунка 1.5 видно, что добавка водорода позволяет повысить КПД цикла на средних нагрузках более чем на 5%. При этом отмечается эффективность смешанного регулирования мощности двигателя.

1.4 Обзор результатов, представленных в диссертации Г. Б. Талда

В работе Талда Г. Б. показаны две возможности применения водорода в транспортных ДВС. Это добавка водорода к основному топливу и применение чистого водорода. Применение чистого водорода как моно топлива, вызывает множество конструктивных проблем, а именно: первое на смесях близких к стехиометрическим скорость горения водорода соизмерима со скоростью звука, что приводит к образованию ударных волн и разрушению элементов ДВС; второе при подаче большого количества водорода во впускной коллектор возникает опасность объемного взрыва, связанная с тем что стехиометрическая смесь водорода воспламеняется от нагретых до высоких температур отработавших газов и элементов впускного клапана. По этой причине двигатели на чистом водороде не могут в настоящее время эксплуатироваться на мощностных составах смеси близких к 1. А использование бедных смесей приводит к значительному уменьшению энергоемкости двигателя, так что его мощность падает в 2 раза и говорить о коммерческом применении чистого водорода пока преждевременно.

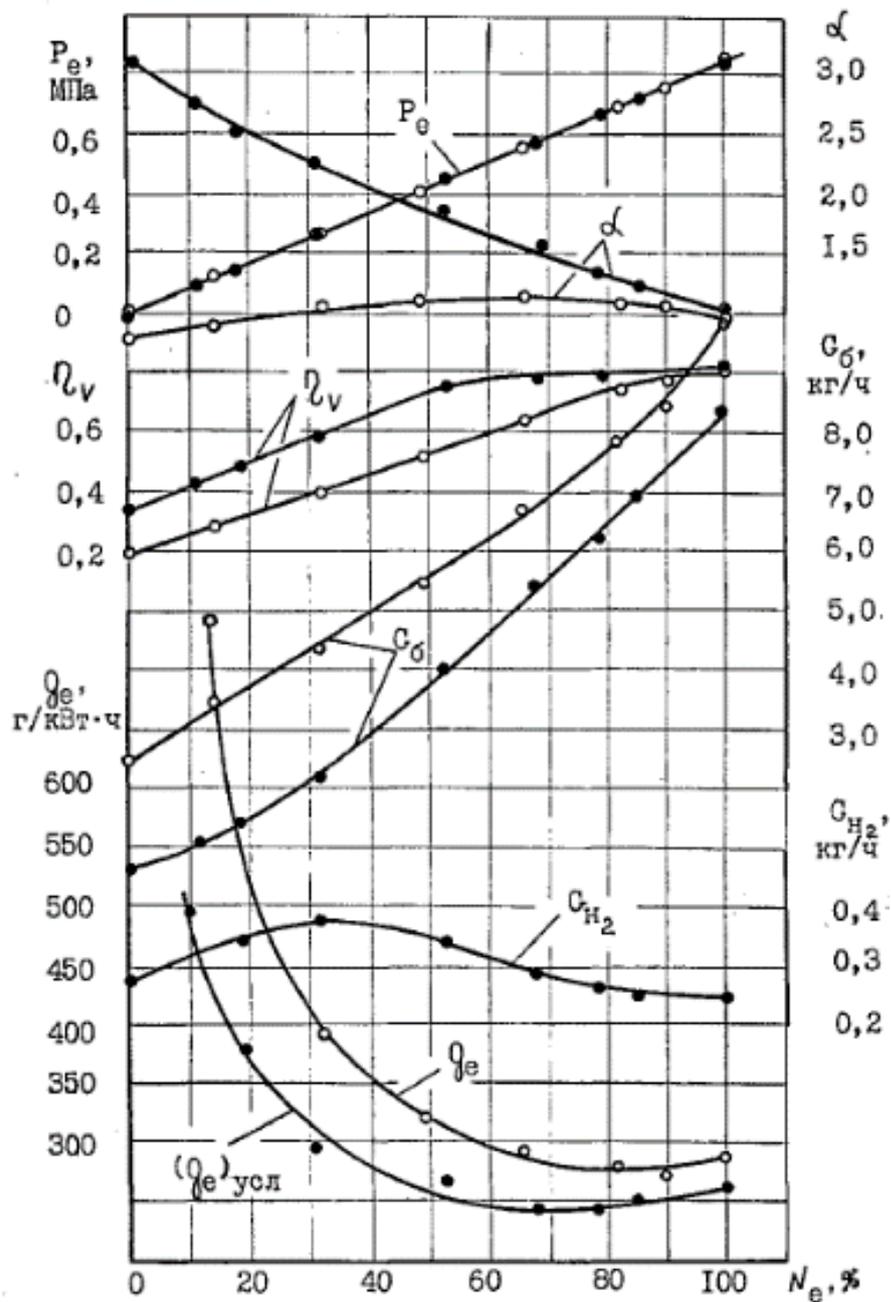
На рисунке 1.6 представлена характеристика двигателя ЗИЛ – 130 по изменению нагрузки при частоте вращения $n=1400 \text{ мин}^{-1}$. Видно, что состав смеси при работе на бензоводородном топливе сильно меняется от 3 на низких нагрузках до 1 на максимальной, в тоже время при работе на бензине состав смеси меняется от 0,8 на низкой нагрузке и до 1 – 0,95 на максимальных нагрузках. Это говорит о возможностях широкого регулирования составом смеси при добавках водорода в бензовоздушную смесь.



○ работа на бензине; ● работа на бензине с добавкой водорода.

Рисунок 1.6 – Характеристика двигателя ЗИЛ – 130 по изменению нагрузки при частоте вращения $n=1400 \text{ мин}^{-1}$.

Похожая картина наблюдается и при добавке водорода в двигатель ЗМЗ-24Д при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ на нагрузочном режиме работы (рисунок 1.7), где видно наибольший расход водорода приходится именно на режимы низких нагрузок до 40% от максимальной. При увеличении нагрузки и уменьшении степени разбавленности остаточными газами и обогащении смеси доля водорода для эффективного сгорания уменьшается.

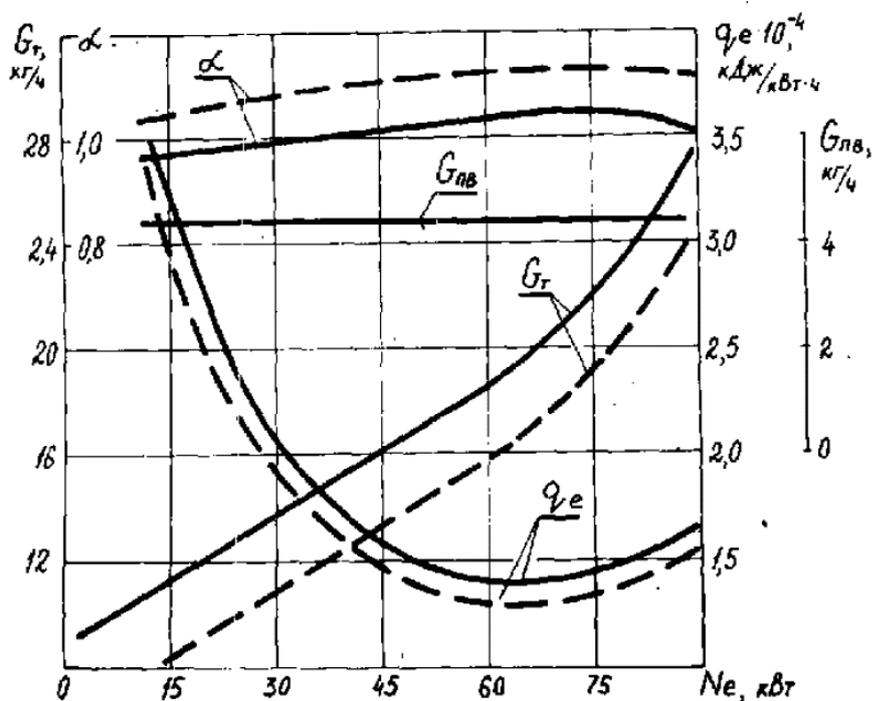


○ работа на бензине; ● работа на бензине с добавкой водород
 Рисунок 1.7 – Характеристика двигателя ЗМЗ-24Д по изменению нагрузки при частоте вращения $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$

1.5 Обзор результатов, представленных в диссертации В.В. Румянцева

В работе Румянцева В. В. проведен анализ влияния добавки водорода в топливо на расширение пределов устойчивого сгорания

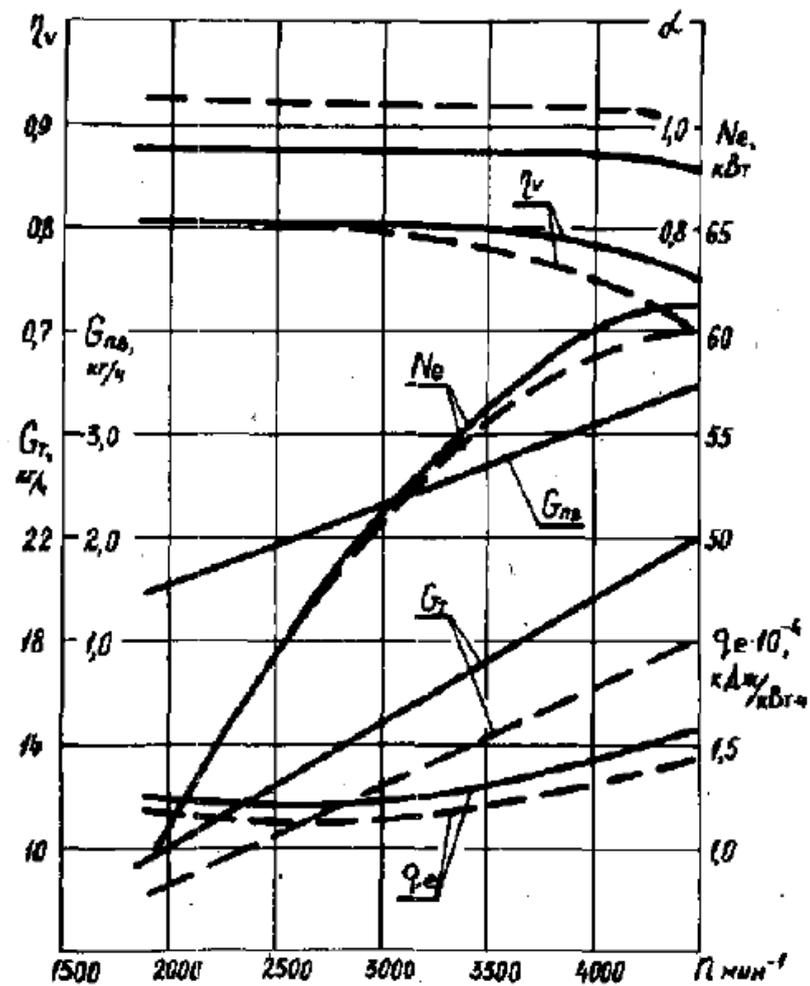
бензоводородовоздушной смеси при её обеднении, для определения возможностей качественного регулирования нагрузкой как это реализовано в дизельных двигателях. Такой подход позволил бы значительно повысить эффективность работы на частичных нагрузках, которые являются основными при движении в городском цикле. Подобный подход он пытался реализовать для двигателя ЗИЛ-130 (рисунок 1.8), где в качестве бортового источника водорода использовался специальная установка по получению пароводорода.



----- бензине, — бензине с добавкой пароводорода ($K = 4,26$)

Рисунок 1.8 – Характеристика двигателя ЗИЛ – 130 по изменению нагрузки при частоте вращения $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$

Добавка пароводорода привела к уменьшению коэффициента избытка воздуха для совершения полезной работы, как это показано на рисунке 1.9, где показаны экспериментальные исследования скоростной характеристики на двигателе для легкового автомобиля ЗМЗ - 24Д при максимальной нагрузке.



----- при работе на бензине,

———— при работе на бензине с добавкой пароводорода ($K = 4,26$)

Рисунок 1.9 – Скоростная характеристика двигателя ЗМЗ - 24Д при максимальной нагрузке

Показано улучшение всех характеристик при добавке пароводорода в бензовоздушную смесь.

1.6 Обзор результатов, представленных в монографии Бортникова Л. Н.

В монографии Бортникова Л. Н. приведены исследования, собранные им в течение долгой и успешной исследовательской деятельности. Во время выполнения исследований в качестве объекта испытаний применялись

последовательно по времени выполнения работ, как указывалось выше, различные двигатели из ряда Волжского автомобильного завода: ВАЗ–1111, ВАЗ–21083, роторно-поршневого двигателя (РПД) ВАЗ–4132, ВАЗ–2111, ВАЗ–2114. Первые три типа являлись карбюраторными, следующие – двигателями, укомплектованными системами впрыска и электронного управления.

Приводимые ниже результаты получены при исследованиях ДВС с электронной системой управления и впрыском топлива.

На рисунке 3.1 приведены типовые результаты испытаний в виде характеристики по УОЗ, измеряемого на данном графике и в дальнейшем в градусах угла поворота коленчатого вала, полученные без водорода и с подачей водорода для режима, характеризуемого средним эффективным давлением $P_e = 0,2$ МПа. На данном рисунке экспериментальные точки для наглядности, как и при необходимости в дальнейшем, соединены линиями.

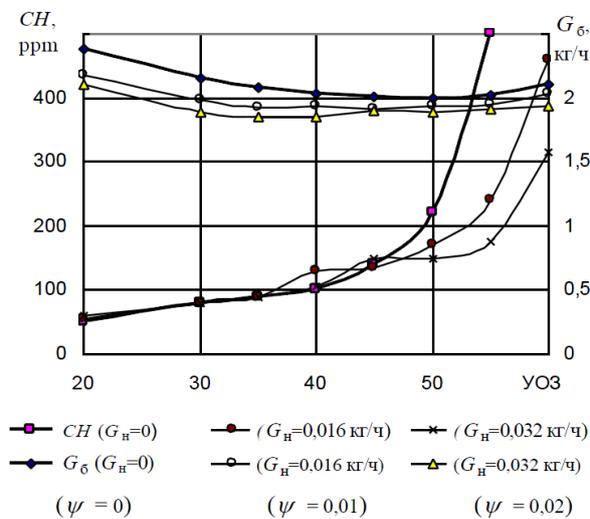


Рисунок 1.10 –Изменение показателей двигателя при различных УОЗ

($\psi = 1,2$; $n = 2000$ мин⁻¹; $P_e = 0,2$ МПа)

Рассмотрение данных графиков, и аналогичных зависимостей (см. рисунки 1.11) позволяет отметить, что снижение расхода бензина при добавках водорода сопровождается смещением его минимума в сторону

меньших углов, что может свидетельствовать об увеличении скорости распространения пламени в топливной смеси [19, 60].

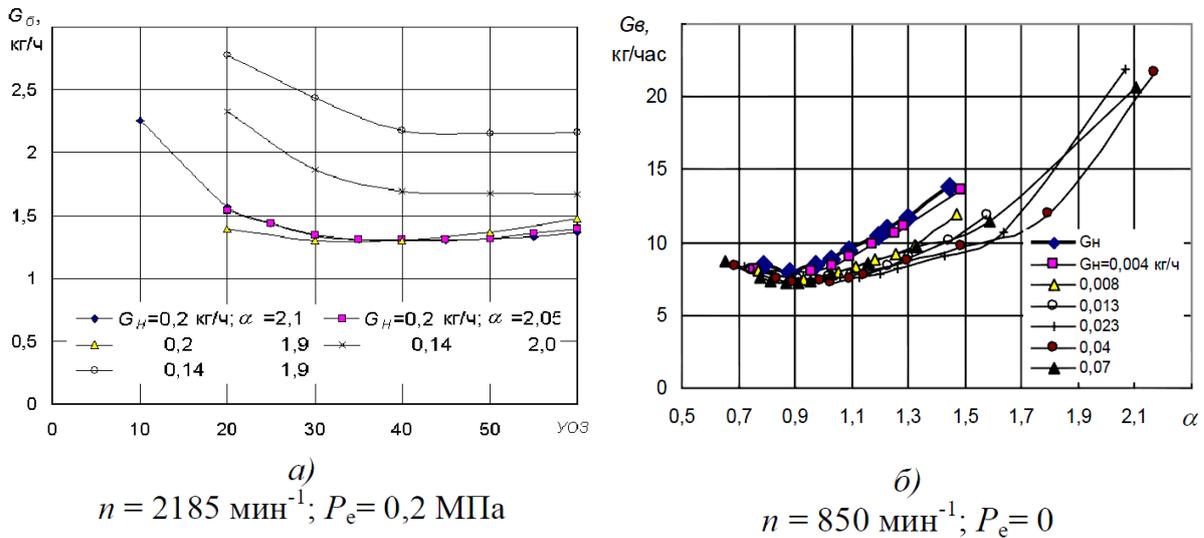


Рисунок 1.11 – Зависимость расхода бензина и воздуха от УОЗ и α

Результаты измерений, полученные при увеличении расхода водорода и работе двигателя на разных скоростных и нагрузочных режимах приведены на рисунке 1.12. Можно видеть, что оптимальный по расходу бензина УОЗ при работе двигателя на минимальной частоте ХХ при добавках водорода сначала увеличивается, а затем уменьшается.

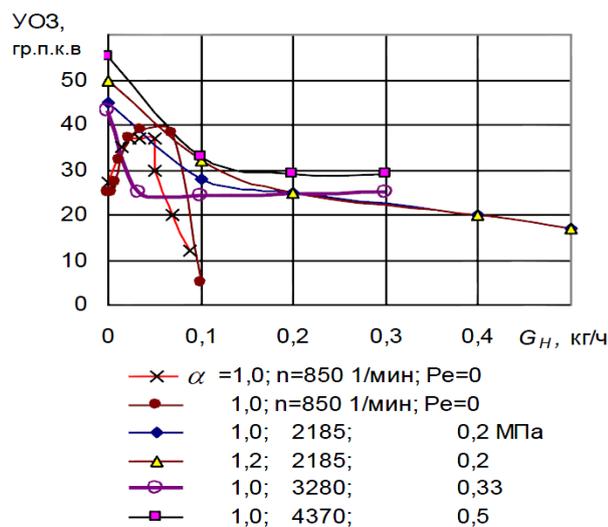


Рисунок 1.12 – Изменение оптимального по расходу бензина УОЗ при увеличении в топливе доли водорода (n и $P_e = var$)

С увеличением частоты вращения вала и нагрузки при добавках водорода отмечается только снижение оптимального угла. Данный факт так же позволяет отметить существенную зависимость эффектов влияния водорода от режима работы двигателя и необходимость её исследования.

На рисунках 1.13 и 1.14 приведены для примера первичные данные, полученные при снятии регулировочных характеристик по составу смеси при постоянной мощности и работе двигателя на холостом ходу при минимальной частоте вращения вала.

Можно видеть, что подача водорода при возрастании α до значений равных $\alpha = 1 - 1,2$ приводит к снижению расхода бензина; примерно его постоянству при дальнейшем увеличении α вплоть до предела эффективного обеднения.

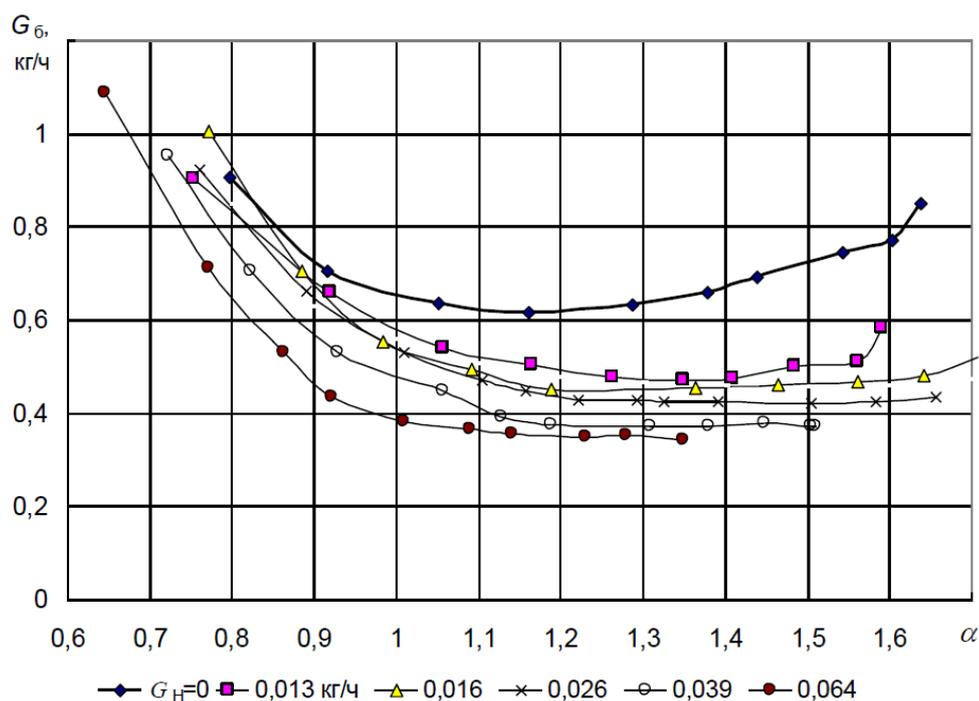


Рисунок 1.13 – Регулировочная характеристика ($n = 850 \text{мин}^{-1}$; $P_e = 0$;
УОЗ = 16° ПКВ)

Приведенные на рисунках 1.15, 1.16 результаты позволяют отметить, что область минимальных значений расхода бензина вне зависимости от УОЗ

с увеличением добавок водорода существенно расширяется, т.е. величина G_b практически мало зависит при этом от, α в достаточно широком диапазоне его изменения. В частности, как можно видеть, при $G_H = (0,04 - 0,07)$ кг/ч расход бензина остаётся практически постоянным в диапазоне, α от 1,1 до 1,8.

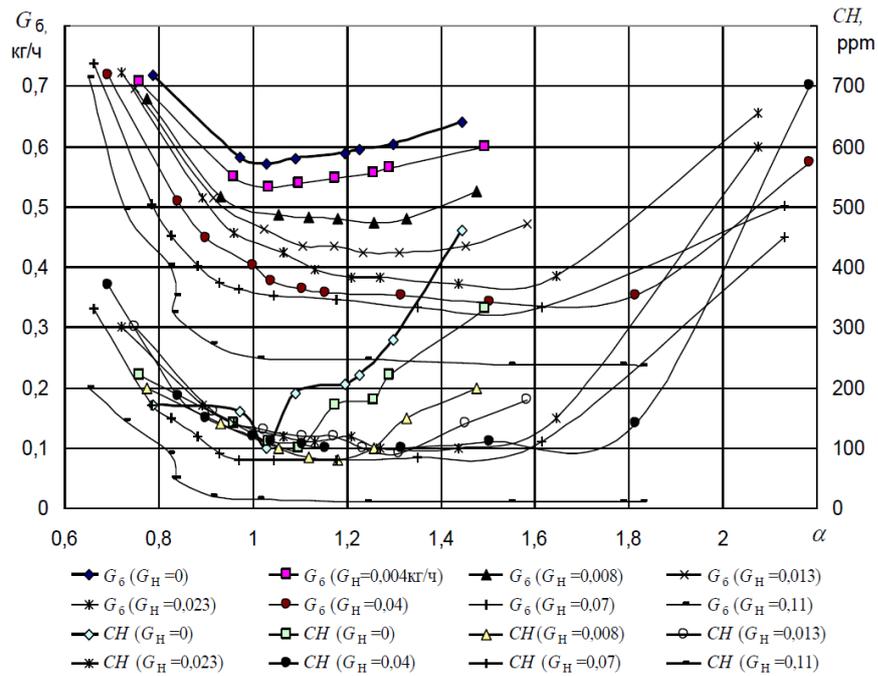


Рисунок 1.14 - Регулировочная характеристика

($n = 850 \text{ мин}^{-1}$; $P_e = 0$; УОЗ = опт)

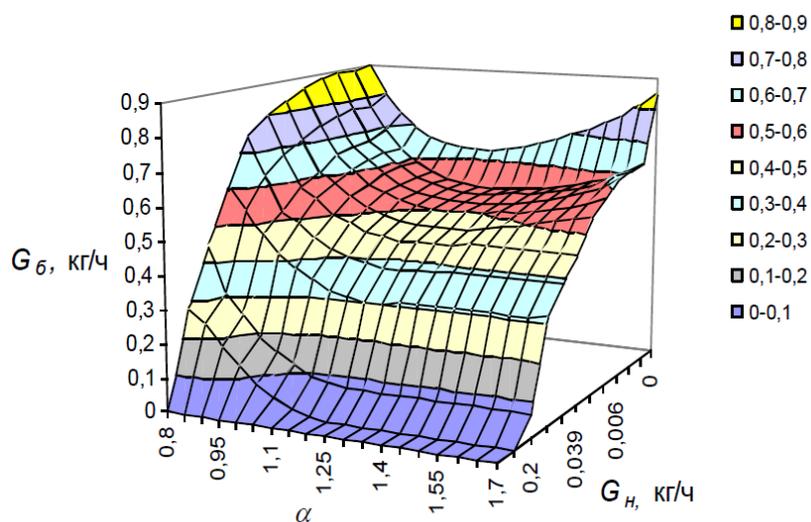


Рисунок 1.15 – Изменение расхода бензина при подаче водорода ($n = 850$

мин^{-1} ; $P_e = 0$; УОЗ = опт.)

На рисунке 1.16 приведены графики изменения расхода бензина при работе ДВС на БВВС и увеличении доли водорода до 100%. Можно видеть, что при работе на водороде, т.е. при $G_6 = 0$, на холостом ходу и минимальной частоте вращения вала работоспособность двигателя сохраняется до $\alpha \approx 6,3$. При этом расход водорода во всем диапазоне α изменяется весьма незначительно.

На рисунке 1.17 приведены типичные результаты измерений показателей двигателя при работе по регулировочным характеристикам при частоте вращения вала $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузке $P_e = 0,2 \text{ МПа}$ при добавках водорода и оптимальных по расходу бензина УОЗ, в том числе и при рециркуляции ОГ. Отметим, что данный режим представляет осреднение первой части ездового цикла по ГОСТ Р 41.083-2004 (Правила 83-05 ЕЭК ООН), чем определяется практика его применения при исследованиях экономичности и токсичности ДВС в стендовых условиях.

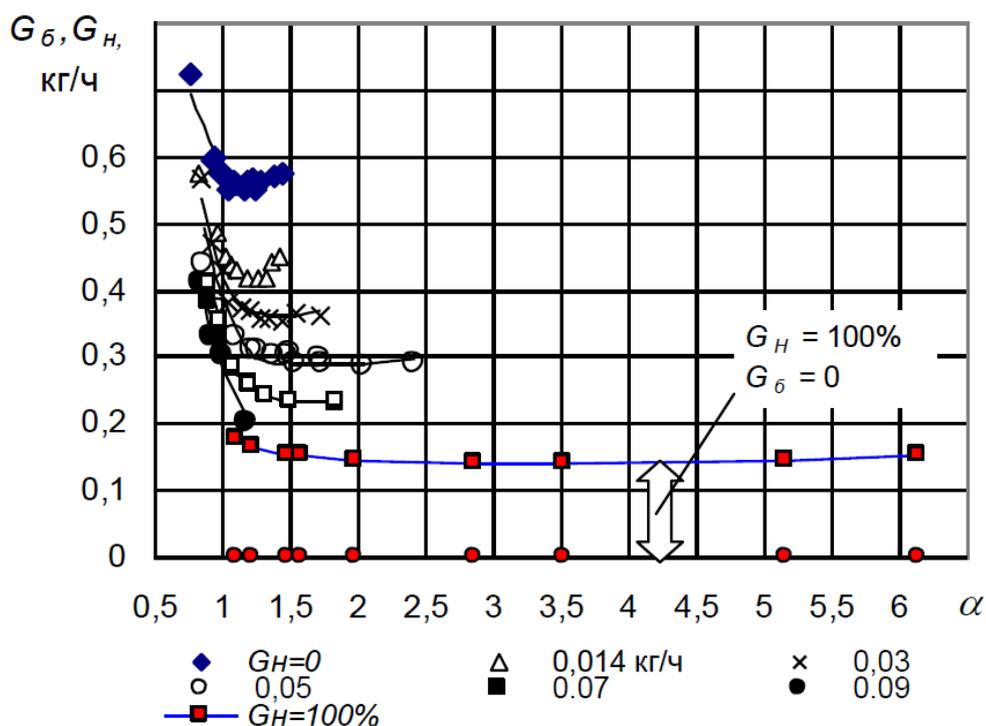


Рисунок 1.16 – Изменение расхода бензина при увеличении доли водорода ($n = 850 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0$, УОЗ = 16° ПКВ)

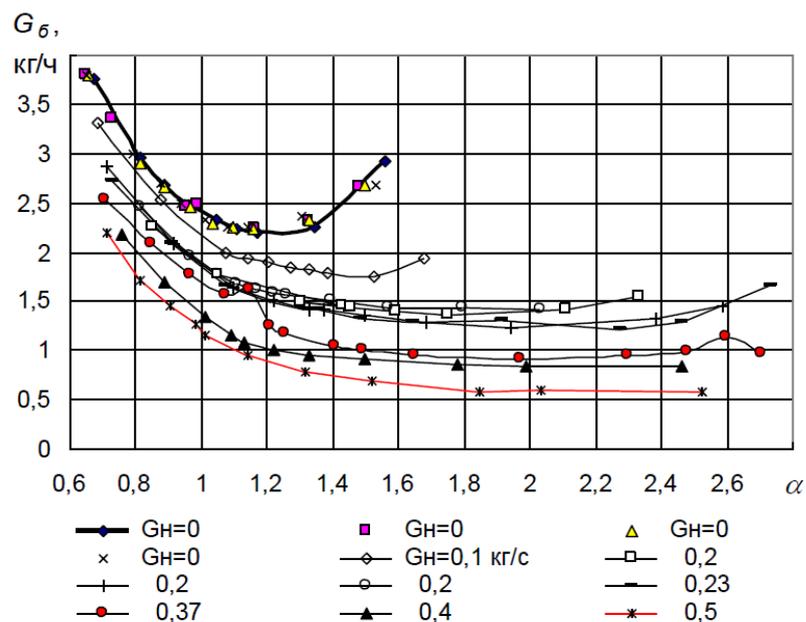


Рисунок 1.17 – Регулировочные характеристики по составу смеси при работе на БВВС ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$; $P_e = 0,2 \text{ МПа}$; УОЗ = опт; T_g – температура ОГ перед нейтрализатором)

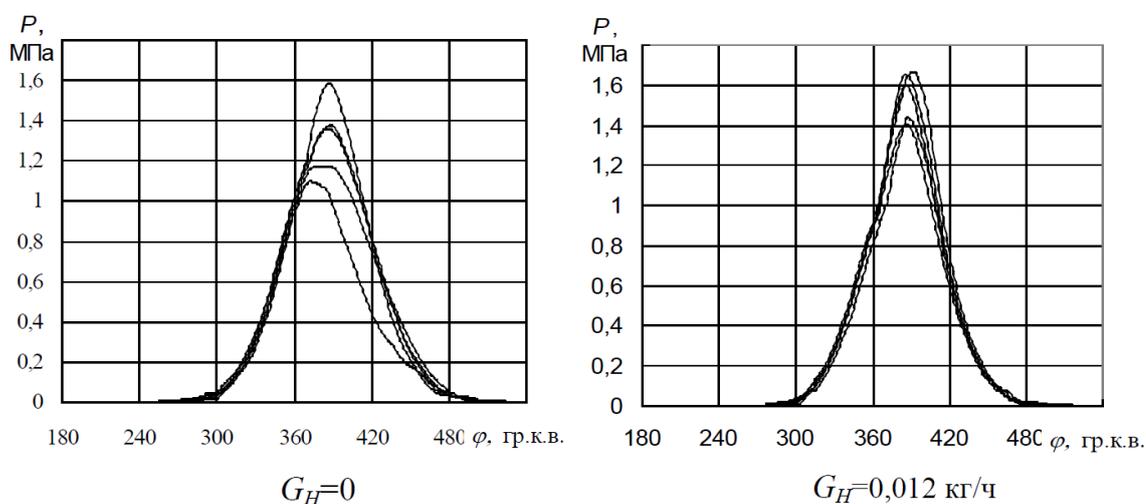


Рисунок 1.18 – Изменение давления в цилиндре двигателя ($n = 850 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0$, $\alpha = 1,1$)

На рисунке 1.18 приведены результаты измерения давления в цилиндре двигателя при работе на бензине и БВВС по углу поворота коленчатого вала φ , выраженного в угловых градусах (гр. к.в.). Таким образом, неравномерность циклов по максимальному давлению в представлении

данной оценки (или другими применяемыми её видами) снижается почти на 40%, что является одной из причин, как отмечается в известных работах, существенного улучшения показателей ДВС при работе на БВВС [6, 10, 19, 60].

1.7 Выводы по Главе 1 «Изучение литературы для выявления и оценке эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС»

Проведенный обзор литературы для выявления и оценке эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС показал, что основные исследования проводились на сильно устаревших двигателях в основном карбюраторных. Редкие исследования проводили оценку эффективности протекания внутрицилиндровых процессов сгорания и тепловыделения. Полученные результаты уже оценивали выходные параметры работы двигателя при добавке в него водород. Приведенные результаты показали однозначную эффективность применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС.

ГЛАВА 2 Описание экспериментального оборудования

2.1 Экспериментальные стенды

Экспериментальные исследования проводились на одноцилиндровой установке УИТ-85 (рисунок 2.1) и на двигателе ВАЗ-2111 (рисунок 2.2).



Рисунок 2.1 – Внешний вид установки УИТ-85



Рисунок 2.2 – Внешний вид двигателя ВАЗ-2111

Основная информация о геометрических параметрах двигателя УИТ-85: количество цилиндров - 1; рабочий объем - 0,652 л; степень сжатия - 7; диаметр цилиндра - 85 мм; ход поршня - 115 мм; длина шатуна - 266 мм; скорость вращения - 900 об / мин; зажигание - свеча зажигания, с переменным углом опережения зажигания от 0 до 35 ° ПКВ для более наглядного сравнения полученных результатов.

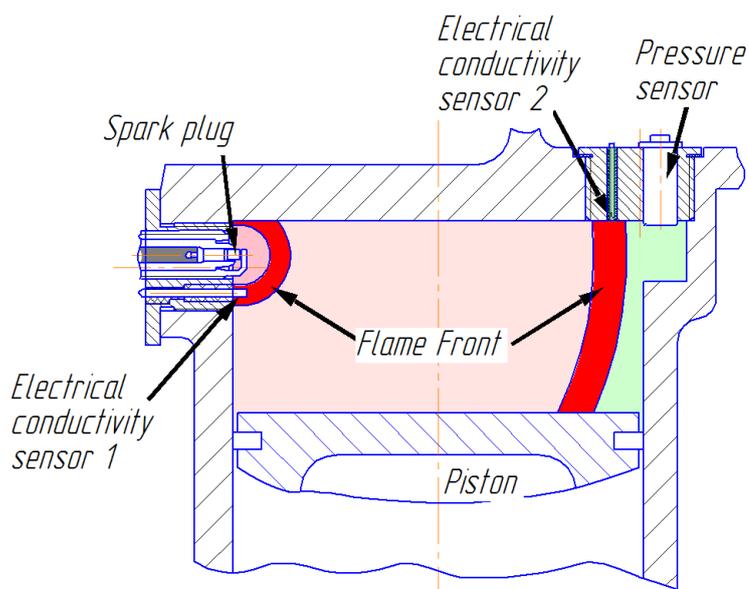


Рисунок 2.3 – Камера сгорания одноцилиндровой исследовательской установки УИТ-85 с установленными датчиками

Давление в цилиндре двигателя измерялось датчиком давления Kistler. Локальные условия распространения фронта пламени определяли с помощью датчиков ионизации.

Исследования рабочего процесса в двигателях с искровым зажиганием активно продолжают в настоящее время. Основное направление проводимых исследований — это поиск новых топлив и способов организации рабочего процесса для осуществления низкотоксичной работы двигателя с искровым зажиганием. Для исследования процесса сгорания применяют различные подходы, это лазерные и оптические методы визуализации процесса сгорания, это применение датчиков ионизации и других исследовательских средств. Но наибольшее распространение имеет способ оценки рабочего процесса по изменению давления в цилиндре двигателя. Этот способ хорошо проработан за многолетнюю практику его применения. Для этого имеется значительное количество разнообразных измерительных инструментов, позволяющих с необходимой точностью измерить давления в ДВС. Обработка и анализ полученных данных является важной задачей при оценке соответствия результатов моделирования ходу

протекания процесса сгорания. Рассмотрим возможности оценки рабочего процесса и основных характеристик распространения фронта пламени по экспериментально полученной индикаторной диаграмме давления в двигателях с искровым зажиганием. Предложенная методика позволяет получать больше информации о процессе сгорания по анализу изменения давления в цилиндре двигателя.

Для построения термодинамической характеристики процесса сгорания нам необходимо оценить изменение объема камеры сгорания по углу поворота коленчатого вала. Для этого определим перемещение поршня в миллиметрах за каждый градус поворота коленчатого вала в интервале: от подачи искры до конца сигнала датчика ионизации. Примем момент окончания сигнала за конец сгорания ТВС в цилиндре.

2.2 Методика поведения эксперимента

Методика эксперимента заключалась в одновременной регистрации на цифровой запоминающий осциллограф с датчика искрового разряда и ионного тока, что позволило определить время от искры до достижения пламенем ионизационного зонда и время окончания сигнала ионного тока. Пример осциллограммы представлен на рисунке 2.4.

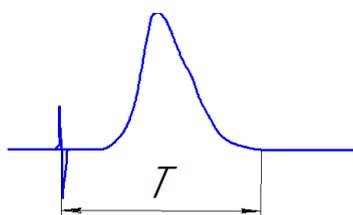
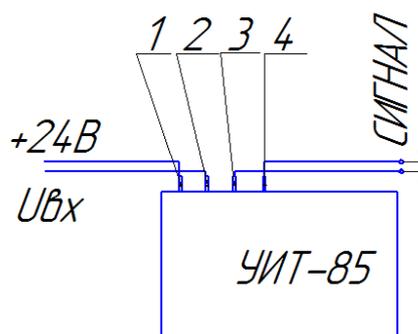


Рисунок 2.4 – Пример осциллограммы

По падению напряжения на резисторе R можем определить ток в цепи. Схема подключения датчиков представлена на рисунок 2.5

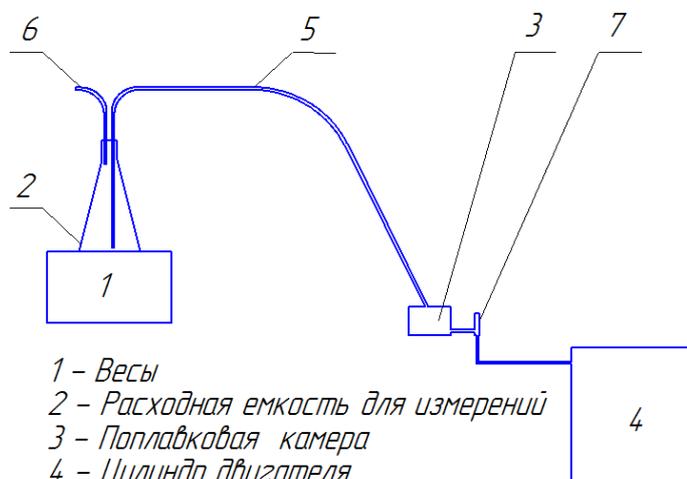
СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ ДАТЧИКОВ



1. Датчик давления
2. Ионизационный датчик
3. Датчик искры
4. Датчик нижней мертвой точки

Рисунок 2.5 – Схема подключения датчиков представлена.

Установка УИТ – 85 была оснащена системой измерения массового расхода топлива, которая представлена на рисунке 2.6.



- 1 – Весы
- 2 – Расходная емкость для измерений
- 3 – Поплавковая камера
- 4 – Цилиндр двигателя
- 5 – Трубка подачи топлива
- 6 – Трубка для увеличения давления, в расх. емкости для прокачки топлива по системе
- 7 – Показатель уровня топлива в поплавковой камере

Рисунок 2.6 – Схема системы измерения массового расхода топлива для испытательной установки УИТ – 85

Подготовка системы к работе:

Топливо набирается в расходную ёмкость (2) для измерений до верхней отметки. Затем не ставя на весы нагнетаем воздух через трубку (6) в расходной ёмкости (2) для заполнения топливом всей системы, после чего уровень топлива опускается до нижней отметки которая соответствует максимальному пределу измерения. Затем необходимо поставить емкость на весы и дождаться, когда топливо в емкости перестанет двигаться для того, чтобы показания весов стабилизировались. Система готова к работе.

Описание работы системы.

Топливо из поплавковой камеры расходуется двигателем, так как в данной системе поплавок камера сообщается с расходной емкостью, а уровень топлива в поплавковой камере одинаковый, то уменьшение массы топлива происходит в расходной емкости. Величина данного уменьшения, есть массовый расход топлива, который измеряется весами (изменение массы).

Одной из особенностей исследования процесса сгорания в поршневых двигателях является необходимость проведения большого числа наблюдений, что требуется для получения статистических характеристик с заданной точностью и надежностью. При этом увеличение числа опытов ведет к дополнительным затратам. Поэтому, для исследования в первом приближении, исходя из минимальности МЦН, и соображений экономии времени и горючего, принято 30 повторных осциллограмм на одном режиме, необходимость и достаточность такого количества повторных измерений показано в работе.

2.3 Определение продолжительности процесса сгорания по изменению показателя политропы в ДВС с искровым зажиганием

Результаты работы определение продолжительности процесса сгорания по изменению показателя политропы в ДВС с искровым зажиганием

выполнялись совместно группой авторов, в результате этот материал опубликован в научном журнале.

Термодинамически рабочее тело в процессе сжатия, сгорания и расширения можно представить, как замкнутую систему имеющую незначительные потери через поршневые кольца, которыми при низких значениях давления можно пренебречь. Причем скорость подвода и отвод теплоты в этой термодинамической системе меняется в процессе движения поршня и протекания процесса сгорания. Направление теплового потока в данной системе описывается политропным процессом [18]. Разберем возможные варианты состояния системы при различных значениях показателя политропы:

- $n = 0$, изобарный процесс, подвод теплоты при постоянном давлении, характерный для двигателя в зоне максимального давления;
- $n < 0$, процесс расширения с подводом теплоты обеспечивающим рост давления, характерно для двигателя, в зоне от ВМТ до максимума давления;
- $n = 1$, изотермический процесс, все подводимое тепло идет на совершение работы;
- $n = 4/3$, адиабатический процесс для 3-х атомного газа, работа совершается за счет уменьшения внутренней энергии;
- $n = 1,4$, адиабатический процесс для 2-х атомного газа, работа сжатия полностью затрачивается на повышение внутренней энергии;
- $n = \infty$, изохорный процесс, подводимое тепло идет на увеличение внутренней энергии, в двигателе это зона ВМТ, причем до ВМТ это $+\infty$, а после $-\infty$.

При анализе процесса сгорания в ДВС с искровым зажиганием имеются определенные трудности при определении момента окончания сгорания [19,20,21]. Анализ изменения показателя политропы проводился на бензиновой одноцилиндровой исследовательской установке УИТ-85 при степени сжатия 7 и частоте вращения 600 мин^{-1} . На рисунок 2.7 и 2.8

представлены классические характеристики изменения показателя политропы полученны для исследовательской установки УИТ-85 [22]. Представлен режим с активным тепловыделением (рисунке 2.7) обеспечиваемым богатой смесью и добавкой водорода и режим работы на бедной смеси (рисунок 2.8). В обоих случаях на сжатии наблюдается линейная картина уменьшения показателя политропы до момента искрового разряда, затем быстрое увеличение показателя политропы до $+\infty$ связанное с началом активного тепловыделения, переход в ВМТ от $+\infty$ на $-\infty$, затем рост связанный с замедлением подвода теплоты вследствие того что его часть тратится на совершение работы. После прохождения 0 (соответствует максимуму индикаторного давления) и 1 (соответствует максимуму температуры) поведение показателя политропы имеет отличие при активном сгорании богатой смеси и медленном сгоранием бедной смеси.

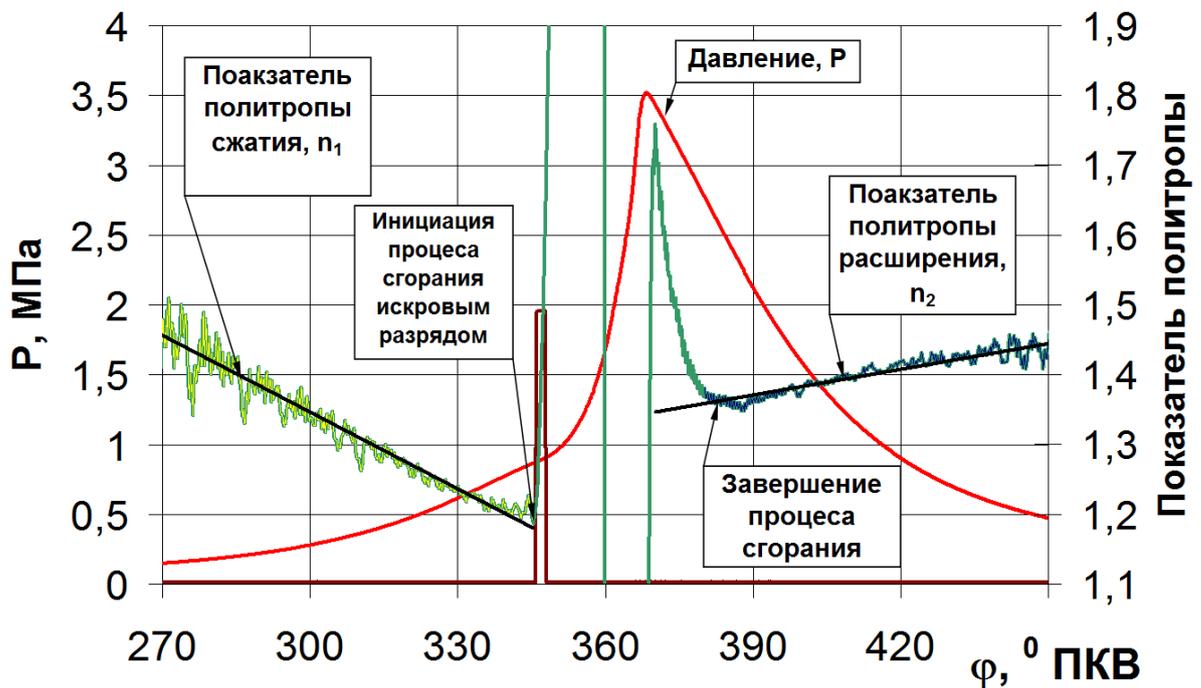


Рисунок 2.7 – Анализ изменения показателя политропы в УИТ-85 при $\varphi_{УОЗ} = 14^{\circ}$ ПКВ и составе смеси $\alpha = 0,892$ при добавке в бензовоздушную смесь 3,38% водорода от массы топлива

Так на рисунке 2.7 показатель политропы растет, это связано с тем, что в это время еще происходит активное тепловыделение [5,6], а затем снижается и переходит в прямую линию характерную процессу расширения. На рисунке 2.8 мы наблюдаем несколько иную картину, там показатель политропы растет до перехода в прямую линию характерную процессу расширения, это связано с тем что тепловыделение в заключительной часть сгорания уже не столь активное.

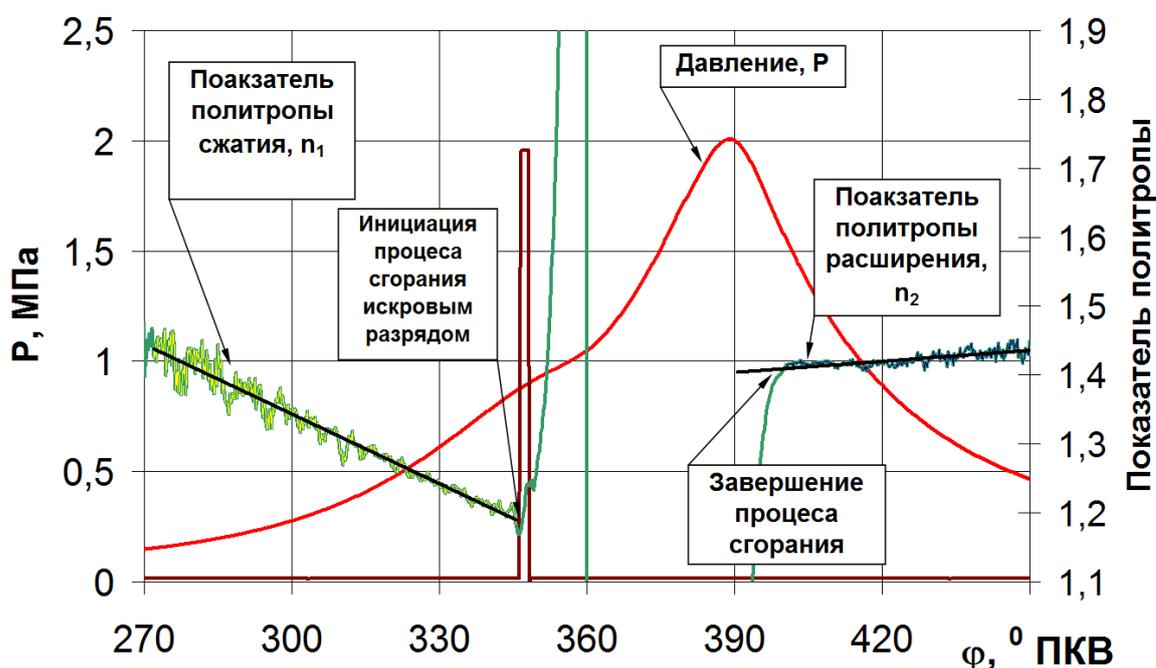


Рисунок 2.8 – Анализ изменения показателя политропы в УИТ-85 при $\varphi_{УОЗ} = 13,5^{\circ}$ ПКВ и составе смеси $\alpha = 1,387$ без добавок водорода в ТВС

Таким образом показано, что как при анализе активно протекающего процесса сгорания, так и процесса сгорания с низкой интенсивностью, анализ изменения показателя политропы позволяет определять момент окончания процесса сгорания с точность в 1 – 3 $^{\circ}$ ПКВ, что является достаточно важным, в том числе и при оценке условий образования токсичных компонентов в процессе сгорания.

2.4 Выводы по главе 2 «Описание экспериментального оборудования»

Анализ результатов представленных экспериментальных исследований показал преимущества использования систем исследования характеристик работы поршневых ДВС и особенно характеристик распространения пламени углеводородного топлива, основанных на использовании регистрации ионного тока пламени. Указанные системы позволяют непрерывно и безинерционно исследовать и контролировать, а при дальнейшем развитии и управлять различными характеристиками работы ДВС.

1. Показано что исследовательская установка УИТ-85, и установка на базе ВАЗ-2111 соответствует задачам проводимых исследований. Установка позволяет с высокой точностью оценивать влияние степени сжатия при сохранении прочих параметров работы двигателя на термодинамические параметры рабочего процесса.

2. Предложен подход по определению продолжительности процесса сгорания по изменению показателя политропы в ДВС с искровым зажиганием. Показана достоверность и точность предложенного подхода.

ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС

3.1 Результаты экспериментальных исследований, проводимых на установке УИТ-85

Экспериментальные исследования, проведенные сотрудниками кафедры в 2004 – 2014 годах представлены в виде обобщенного материала показывающего влияние водорода на активацию процесса сгорания в бензиновых ДВС. На рисунке 3.1 и 3.2 представлено влияние добавки водорода на время от подачи искры до максимального давления в цилиндре при степени сжатия 5.9 (рисунок 3.1) и степени сжатия 7 (рисунок 3.2), для двух скоростных режимов 600 и 900 мин⁻¹ и варьированием УОЗ и коэффициентом избытка воздуха. Из этих графиков видно, что добавка водорода значительно сокращает продолжительность сгорания, причем, как и в исследования проведенных другими авторами, наибольшее влияние оказывает именно первые 1 – 3% добавляемого водорода от массы топлива. Дальнейшее увеличение доли водорода приводит в эффекту замещения одного топлива другим и уже эффекта активации, при котором малые добавки вызывают существенные изменения параметров не происходит. Также следует отметить увеличение эффективности добавки водорода при обеднении смеси и незначительное влияние в зоне богатых смесей. Это показывает перспективность применения водорода именно для активации сгорания бедных смесей. В настоящее время использование режимов работы на бедных смесях возможно только в промышленных и бытовых ДВС, автомобильные ДВС жестко привязаны к нормам токсичности, выполнение которых в настоящее время в основном возможно только при использовании

каталитических нейтрализаторов отработавших газов, самый распространённый из которых трехкомпонентный эффективно работает только в узком диапазоне составов смеси около стехиометрического состава. Поэтому в настоящее время пока не решен вопрос с нейтрализацией ОГ при работе на бедных смесях в ДВС с искровым зажиганием, применение водорода становится не особо интересно крупным автопроизводителям, что сказывается в снижении интенсивности проводимых научных исследований в этой области.

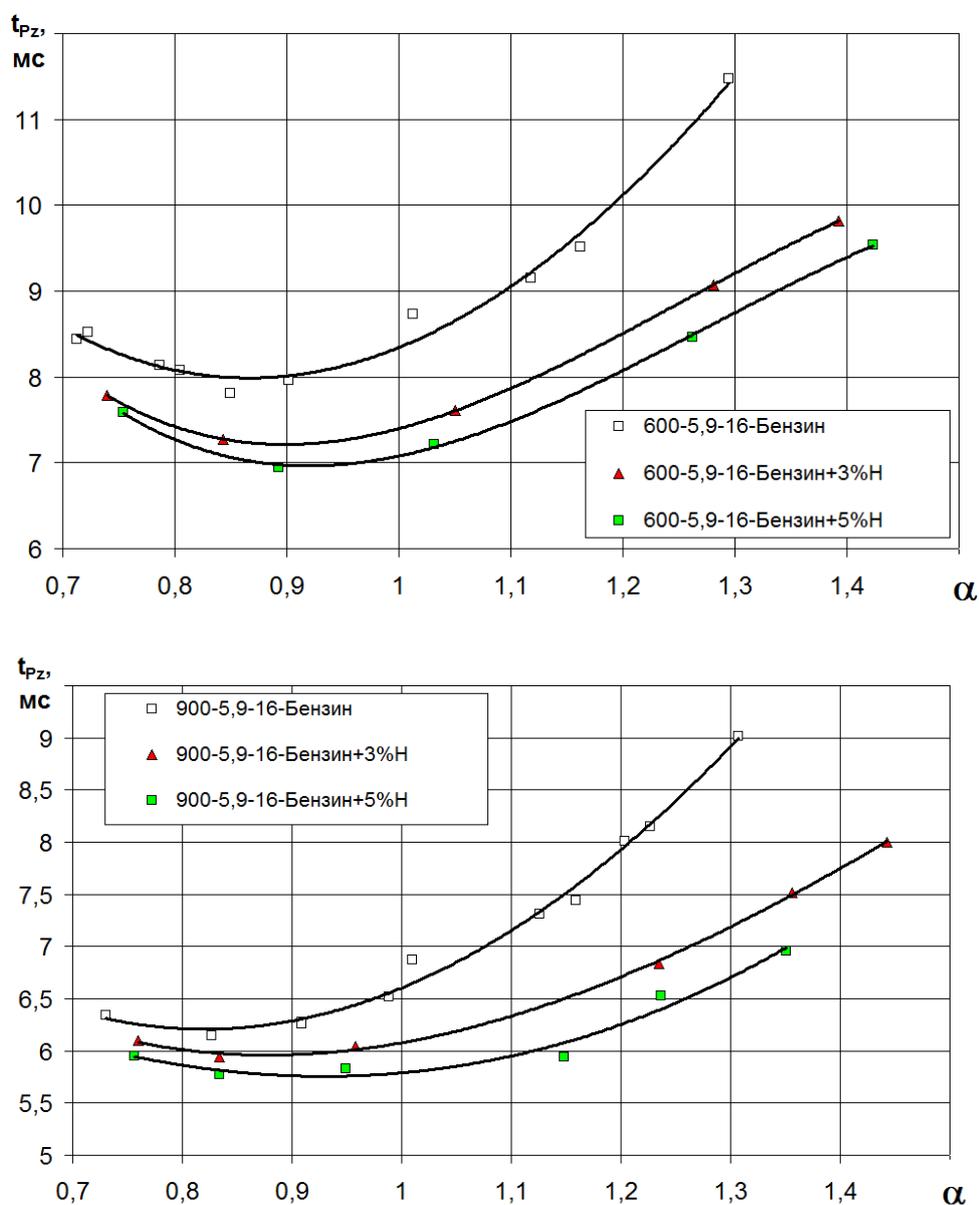


Рисунок 3.1 – Влияние добавки водорода на время от подачи искры до максимального давления в цилиндре при степени сжатия 5.9

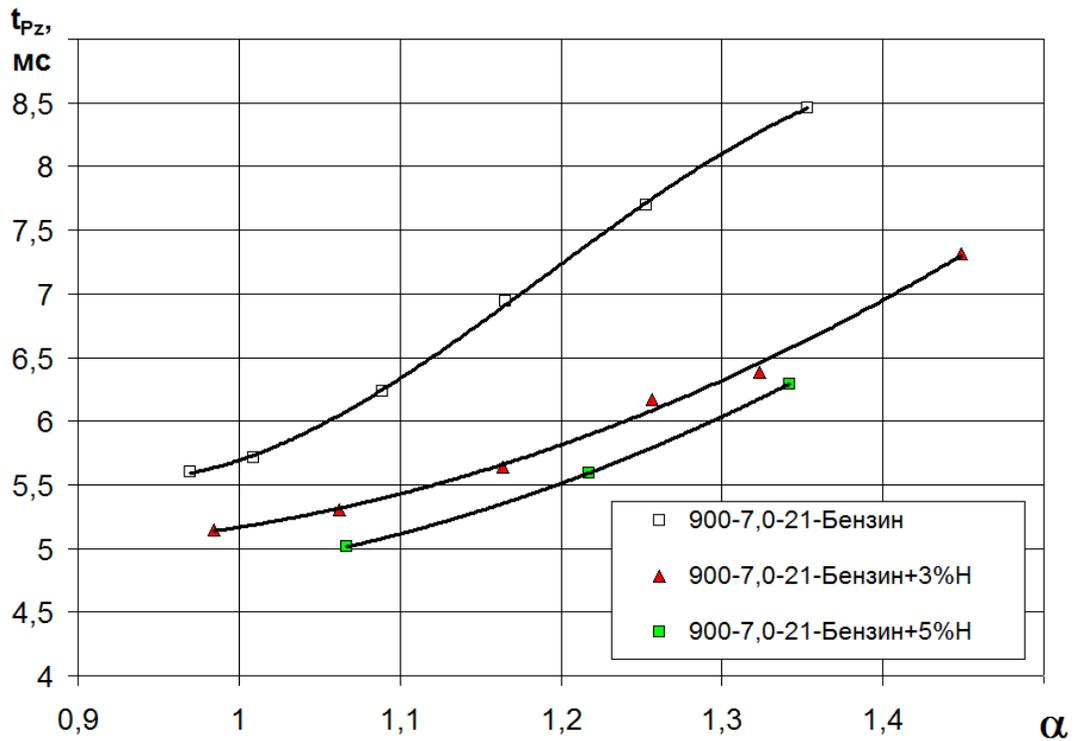
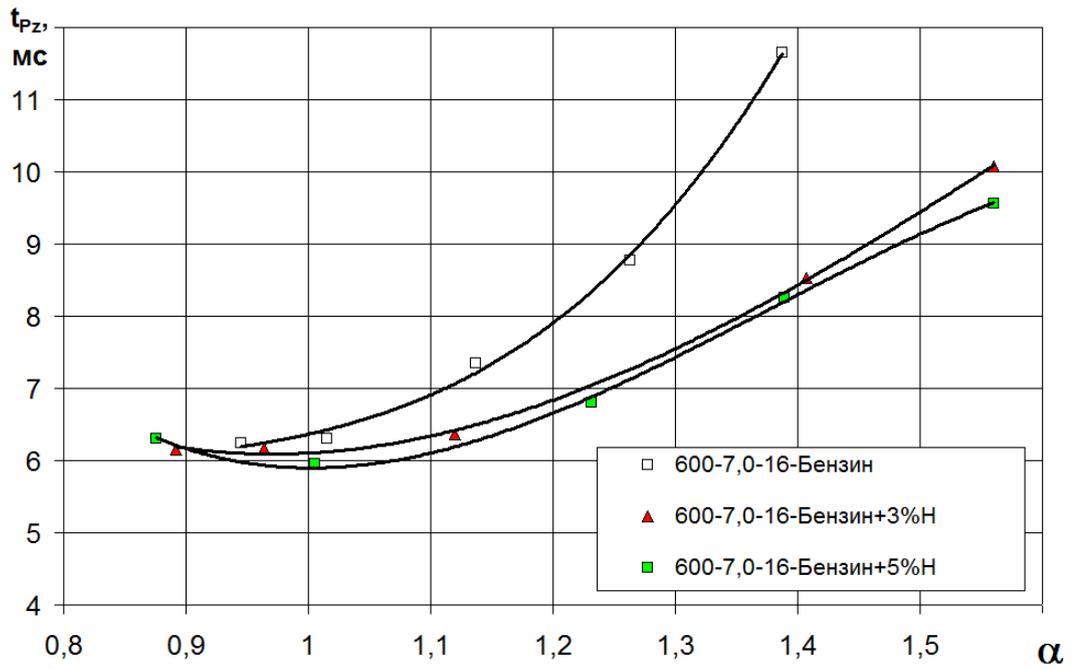


Рисунок 3.2 – Влияние добавки водорода на время от подачи искры до максимального давления в цилиндре при степени сжатия 7

На рисунке 3.3 представлено влияние водорода на максимальное давление в цилиндре для двух степеней сжатия 5,9 и 7, двух скоростных режимов 600 и 900 мин⁻¹ и варьированием коэффициентом избытка воздуха.

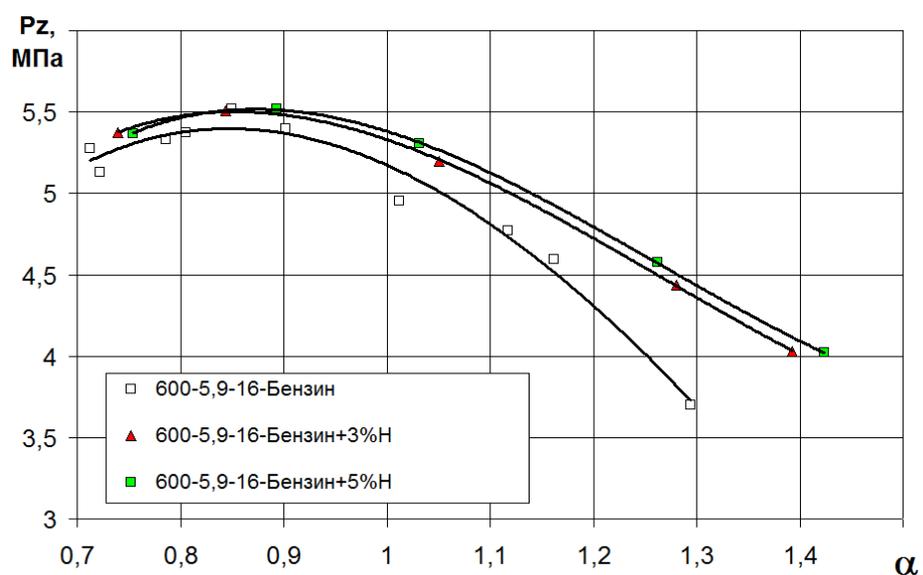
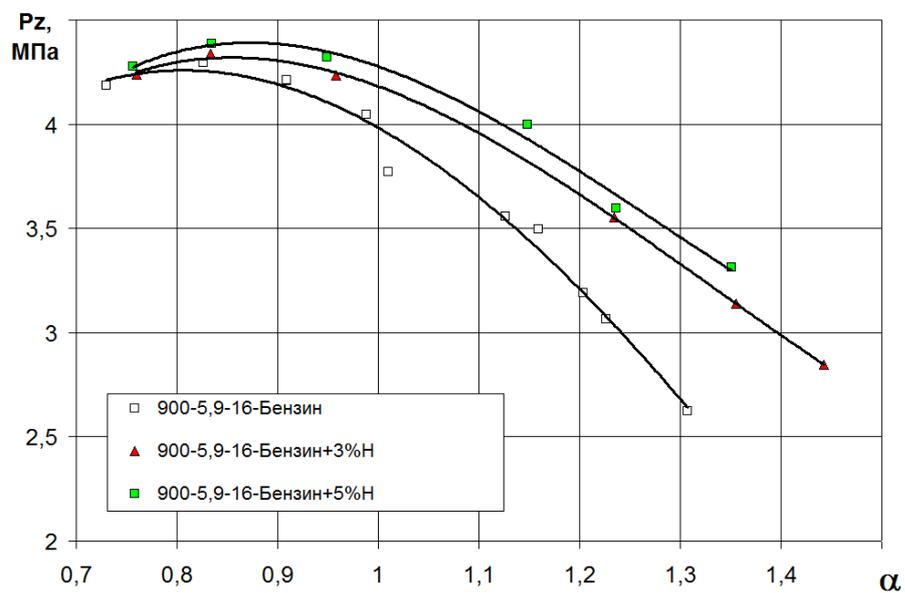
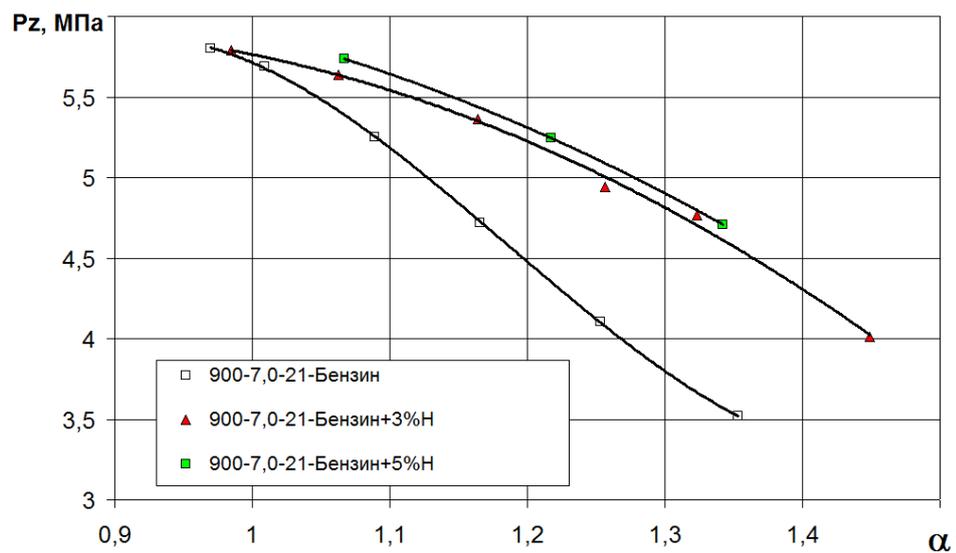


Рисунок 3.3 – Влияние добавки водорода на максимальное давления в цилиндре

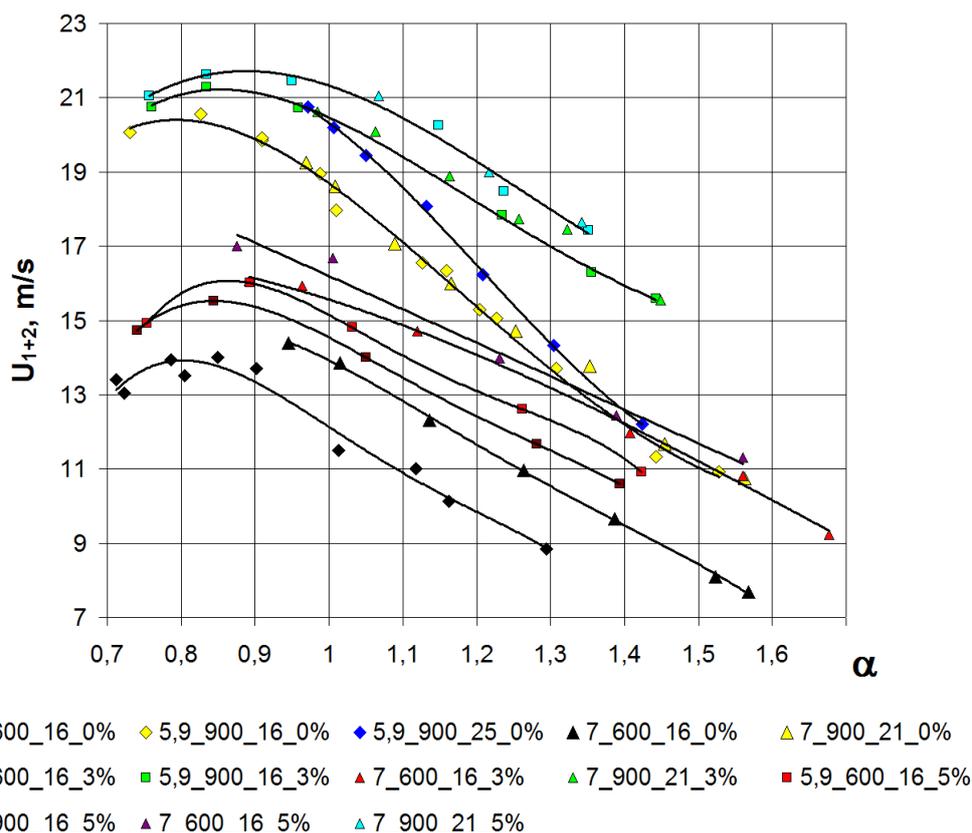


Рисунок 3.4 – Влияние водорода на скорость распространения фронта пламени в основной фазе сгорания

Изменение максимального давления схоже с изменением продолжительности сгорания, только влияние водорода менее заметно, так как водород значительно ускоряет процесс сгорания (рисунок 3.4), но в тоже время вытесняет при впуске воздух снижая объемную энергоемкость свежей смеси, что уменьшает количество энергии, выделяемое в процессе сгорания, поэтому рост давления менее зависит от добавки водорода при хорошем росте общей эффективности процесса сгорания.

3.2 Результаты экспериментальных исследований проводимых на двигателе ВАЗ-2111

Исследование влияния водорода на процесс сгорания в условиях двигателя ВАЗ-2111 проводилось для двух степеней сжатия 9,8 и 7,5 на режиме холостого хода, который по определению является самым

проблемным и сложным по организации эффективного процесса сгорания. На рисунках 3.5 и 3.6 показано влияние водорода на разряжение во впускном трубопроводе при работе на степени сжатия 9,8 (рисунок 3.5) и степени сжатия 7,5 (рисунок 3.6). Видим, что водород оказывает влияние для смесей в бедной области, в зоне богатых и стехиометрических смесей влияние водорода отсутствует.

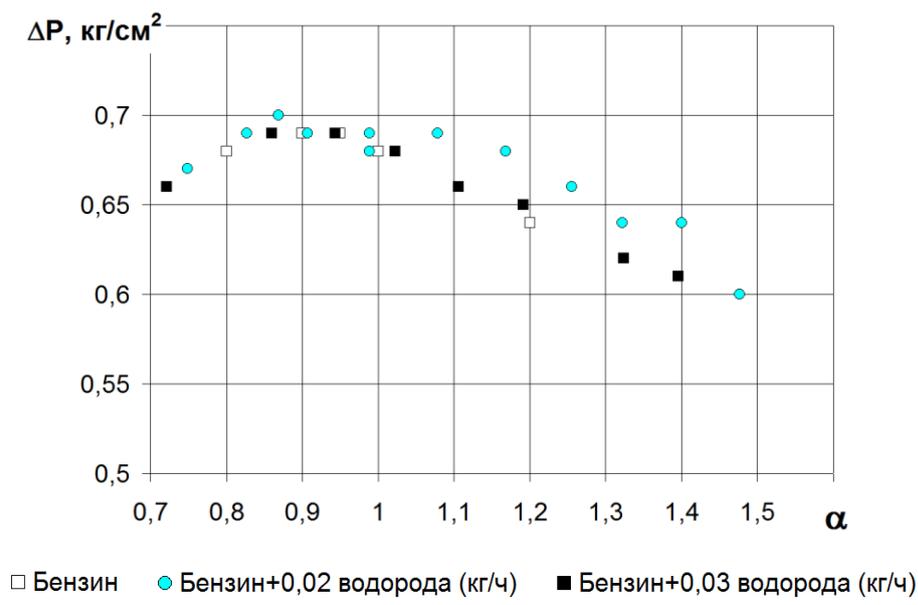


Рисунок 3.5 – Влияние водорода на разряжение во впускном трубопроводе при работе на степени сжатия 9,8

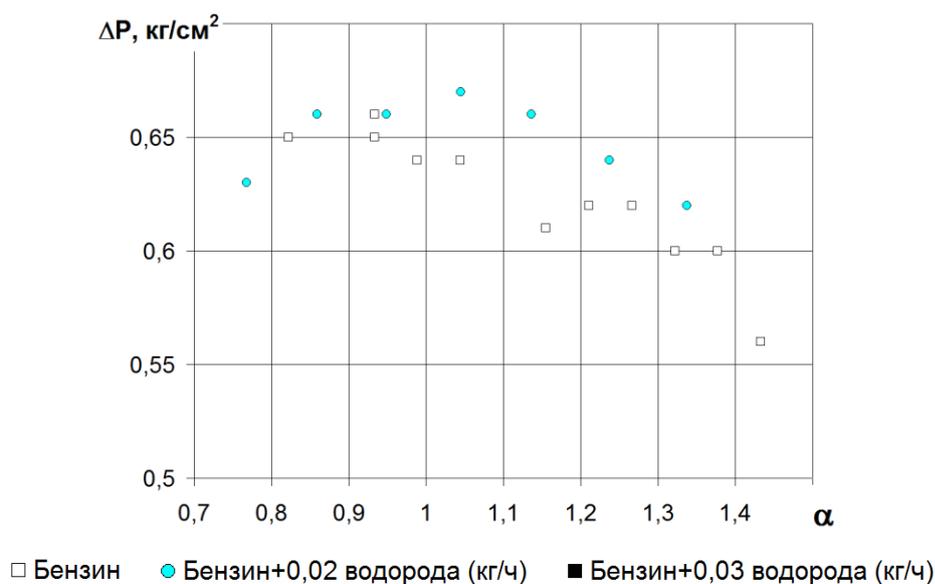


Рисунок 3.6 – Влияние водорода на разряжение во впускном трубопроводе при работе на степени сжатия 7,5

На рисунках 3.7 и 3.8 показано влияние водорода на расход воздуха при работе на степени сжатия 9,8 (рисунок 3.7) и степени сжатия 7,5 (рисунок 3.8). Видим, что водород вытесняет часть воздуха при впуске что снижает его расход для всех составов смеси.

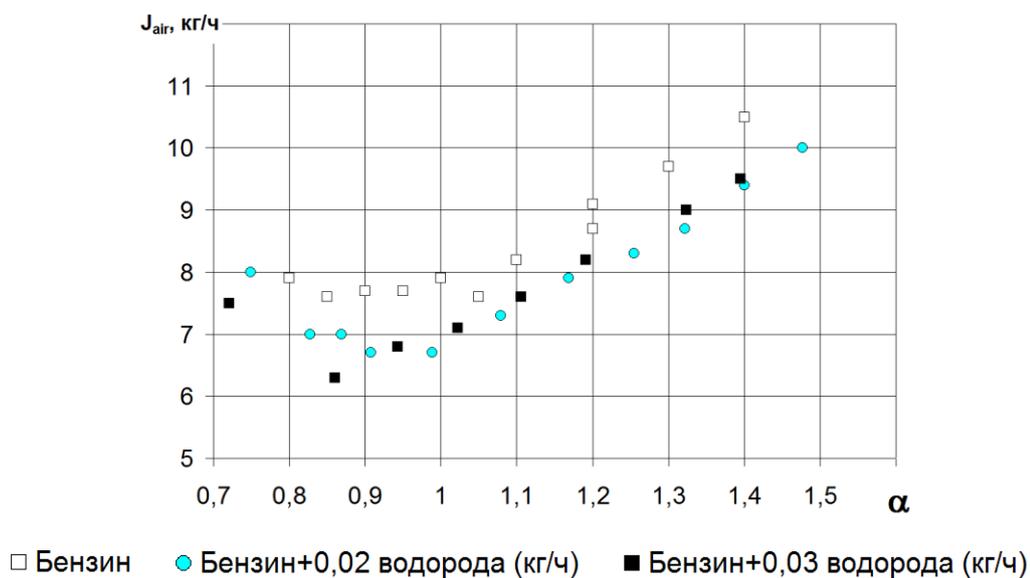


Рисунок 3.7 – Влияние водорода на расход воздуха при работе на степени сжатия 9,8

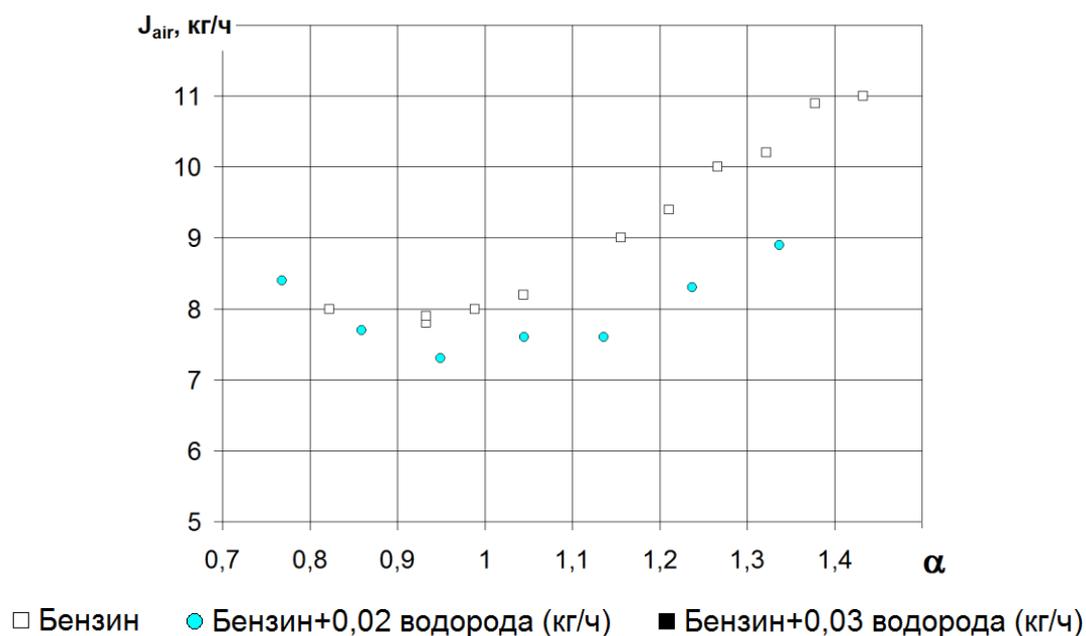


Рисунок 3.8 – Влияние водорода на расход воздуха при работе на степени сжатия 7,5

Помимо режимных параметров работы двигателя добавка водорода влияет на изменение токсичности ОГ, так на рисунке 3.9 приведено влияние водорода на токсичность по несгоревшим углеводородам (СН) в отработавших газах при изменении степени сжатия и состава углеводородного топлива (показана работа на бензине и сжатом природном газе (КПГ)). Из рисунка 3.9 видим, что количество СН при добавке водорода значительно снизилось, особенно это заметно для бедных смесей. Это говорит о повышении полноты сгорания при добавке водорода.

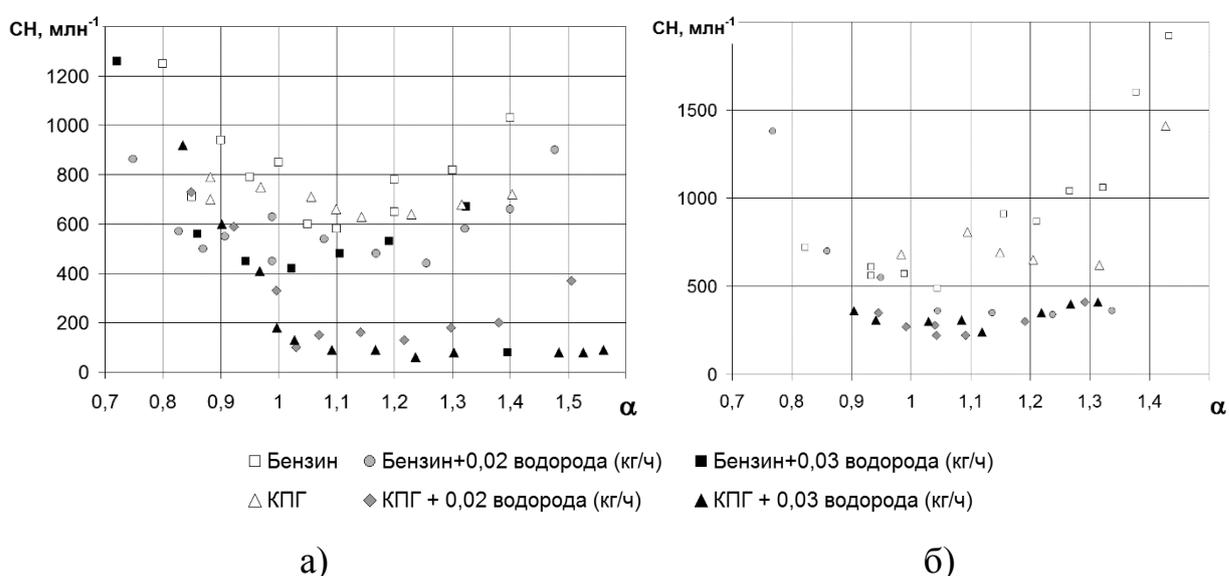


Рисунок 3.9 – Влияние водорода на токсичность по несгоревшим углеводородам в отработавших газах: (а) степень сжатия 9,8; (б) степень сжатия 7,5

Оценивалась также токсичность по продуктам не полного сгорания углерода (рисунок 3.10), где показано влияние добавки водорода на монооксид углерода (СО). Влияние водорода на СО несколько заметней в области богатых смесей, хотя добавка водорода снижает в той же пропорции концентрацию углерода во фронте пламени, но снижение СО несколько больше 3 и 6% соответствующих массовой доле водорода. Следовательно, водород также положительно сказывается на полноте сгорания продуктов не полного сгорания.

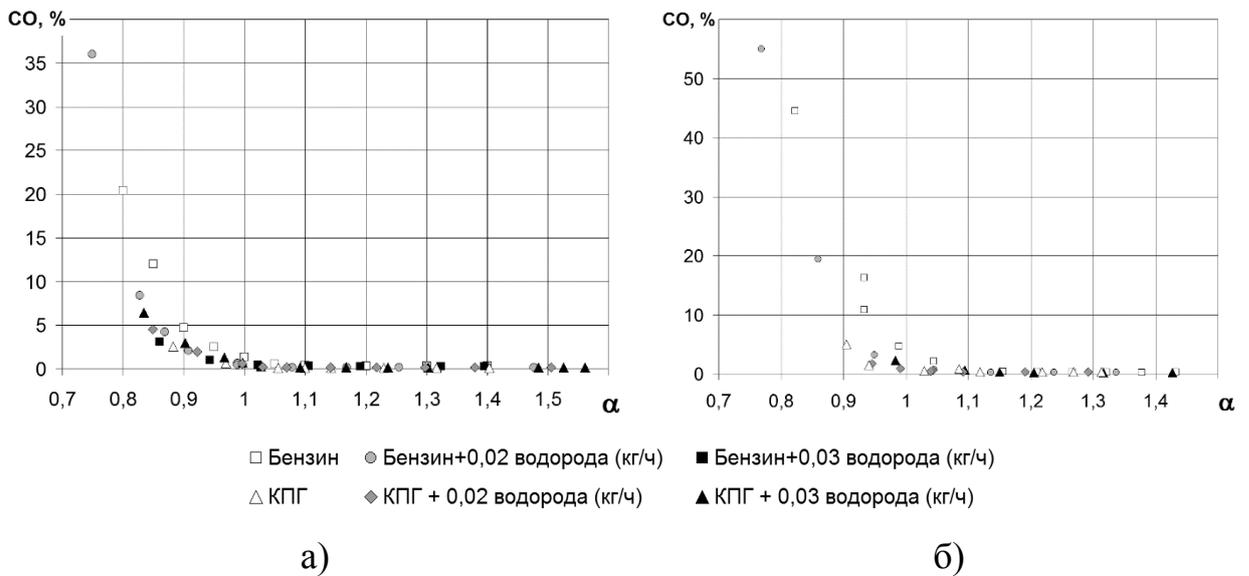


Рисунок 3.10 – Влияние водорода на токсичность по монооксиду углерода (СО) в ОГ: (а) степень сжатия 9,8; (б) степень сжатия 7,5

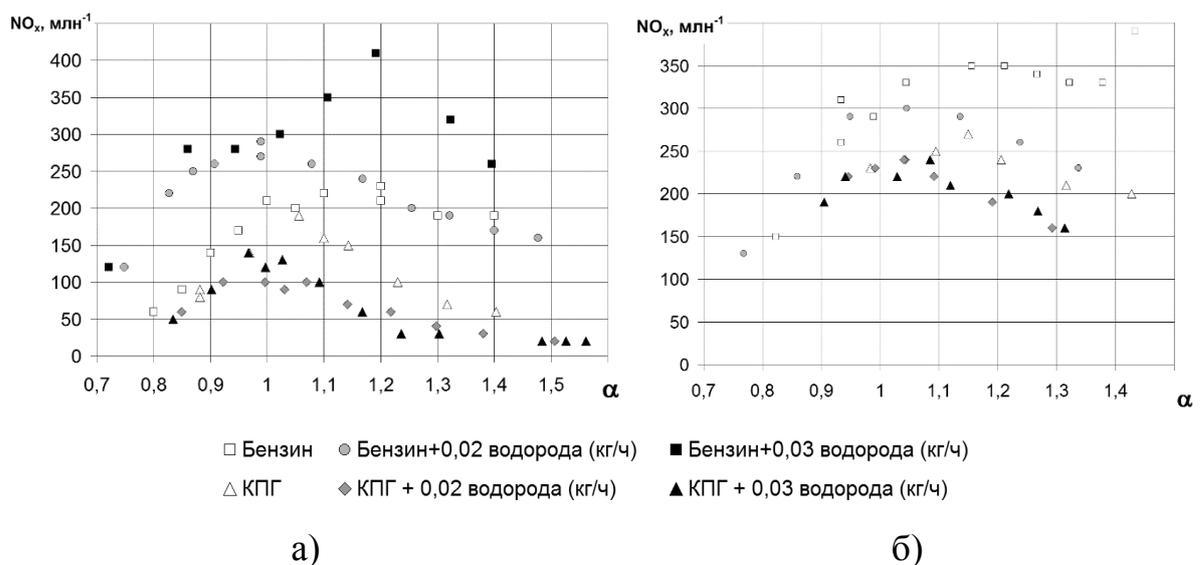


Рисунок 3.11 – Влияние водорода на токсичность по NOx в отработавши газов: (а) степень сжатия 9,8; (б) степень сжатия 7,5

Помимо продуктов неполного сгорания СН и СО, нормируются выбросы продуктов термического окисления NOx. Поэтому на рисунке 3.11 представлено влияние водорода на токсичность по NOx в отработавших газах при работе на степени сжатия 9,8 и 7,5. При работе на бензине добавка водорода вызывает рост токсичности по NOx, это связано с ростом скоростей тепловыделения при добавке водорода, что вызывает больший рост

температуры и, следовательно, пиковые значения при которых образуются NOx со следующим более быстрым охлаждением, вызывающим заморозку NOx без возможности получения равновесного состояния.

3.3 Выводы по главе 3 «Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС»

Анализ результатов представленных экспериментальных исследований показал перспективы применения добавки водорода для активации процесса сгорания бензиновых ДВС, но при этом следует учитывать высокую эффективность добавки водорода при работе на бедных смесях, и низкую эффективность при работе на богатых и стехиометрических смесях. Это показывает необходимость поиска помимо оптимальных перспективных топлив ещё и пути снижения токсичности при работе на бедных смесях.

Глава 4 Выявление возможностей повышения эффективности бензинового ДВС за счет добавки водорода для активации процесса сгорания

4.1 Анализ эффективности бензинового ДВС при активации процесса сгорания добавками водорода на примере установки УИТ-85

Анализ термодинамических параметров позволит нам лучше понять механизм активации процесса сгорания добавками водорода на примере установки УИТ-85. На рисунках 4.1 – 4.4 представлены термодинамические параметры при работе на бензине и при добавке водорода в цилиндре УИТ-85. Показана влияние добавки водорода при степени сжатия 5,9 на частоте вращения 600 мин^{-1} , УОЗ = 15° ПКВ и составе смеси 1,013 при работе без водорода (рисунок 4.1) и 1,05 при 3% добавке водорода (рисунок 4.2), а также при степени сжатия 7 и составе смеси 1,015 (рисунок 4.3) и 1,12 при добавке 3% водорода (рисунок 4.4). Видим, что добавка водорода значительно ускоряет процесс сгорания. Так при сравнении циклов при степени сжатия 5,9 (рисунки 4.1 и 4.2) работа на участке $220-480^\circ$ ПКВ составила с 321,6528 Дж до 325,575 Дж, что показывает рост на 1,2%, с добавкой водорода, а КПД цикла выросло на 7,8%. Угол ПКВ при котором сгорает 10, 50 и 90% ТВС уменьшился с ростом степени сжатия на 2,36, 3,99 и $4,17^\circ$ ПКВ соответственно. Для циклов при степени сжатия 7 (рисунки 4.3 и 4.4) работа на участке $220-480^\circ$ ПКВ изменилась с 349,667 Дж до 334,472 Дж, что составляет 4,3% снижения, при добавке водорода, это объясняется большим значением коэффициента избытка воздуха 1,12 при добавке 3% и 1,015 без водорода, в тоже время КПД цикла выросло на 8,4%. Угол ПКВ при котором сгорает 10, 50 и 90% ТВС изменился при добавке водорода на 0,73, 0,01 и $-0,72^\circ$ ПКВ соответственно. Видим, что добавка водорода в среднем подняла эффективность процесса сгорания на 8%, не столь значительное

увеличение других энергетических показателей связано с меньшим количеством энергии внесенной с топливом в цилиндр двигателя при добавке водорода.

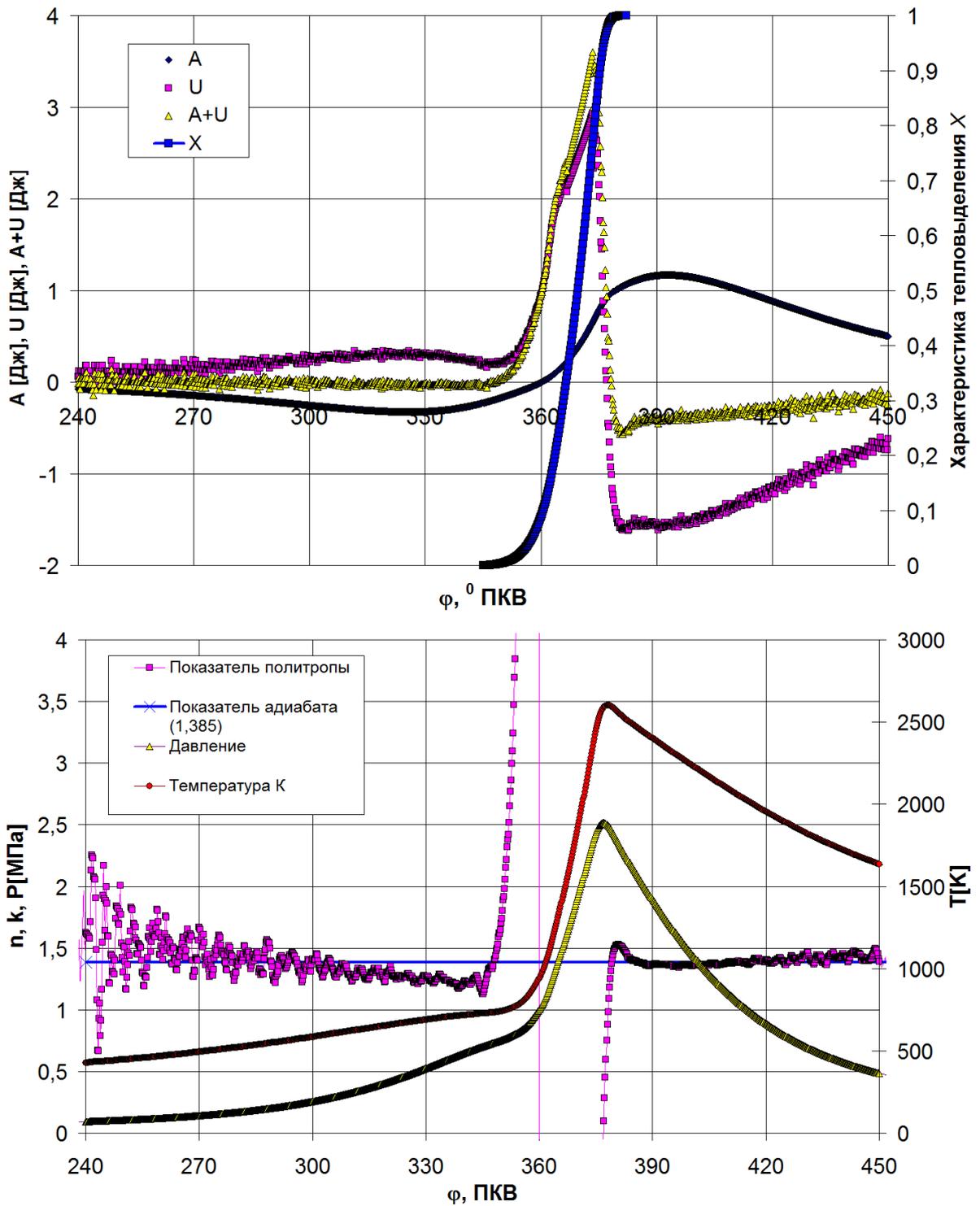


Рисунок 4.1 – Термодинамические параметры без добавки водорода при $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; $\varepsilon = 5,9$; $\alpha = 1,013$

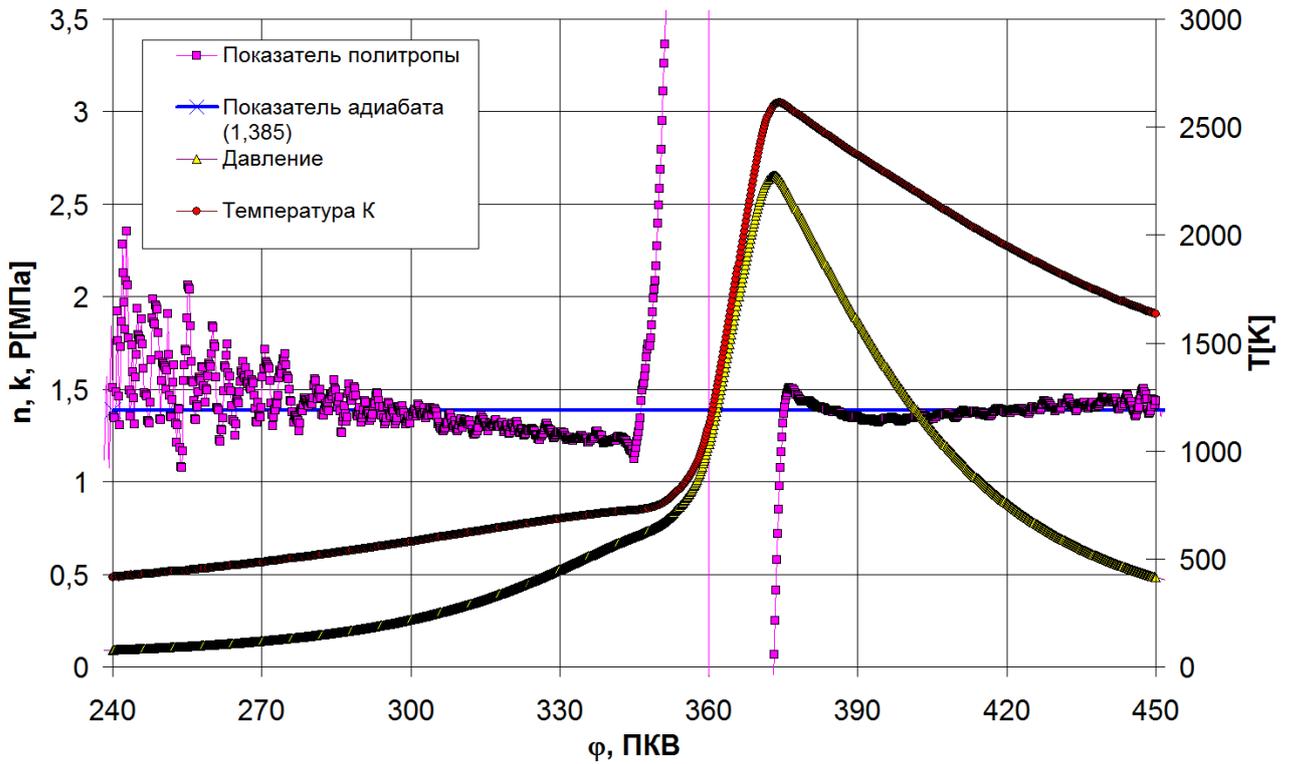
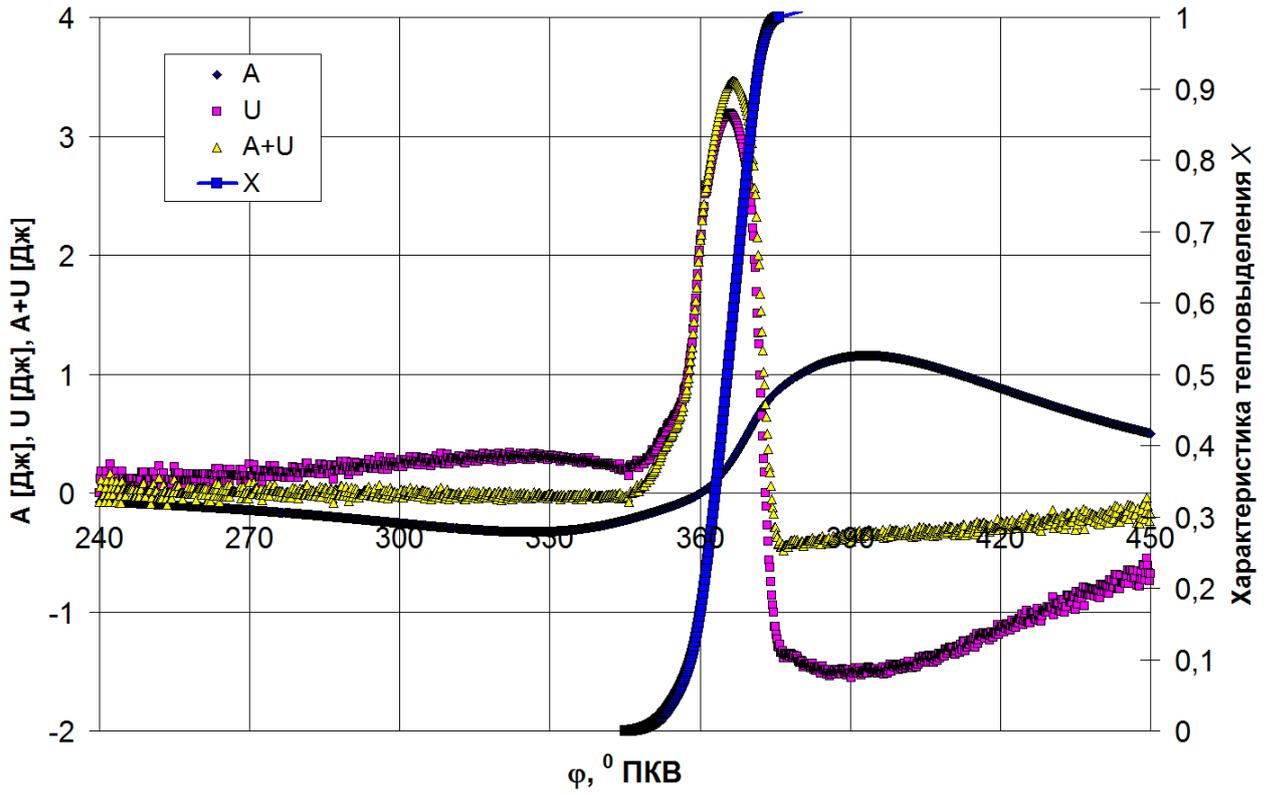


Рисунок 4.2 – Термодинамические параметры при добавке водорода при $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; $\varepsilon = 5,9$; $\alpha = 1,05$; $H = 3\%$

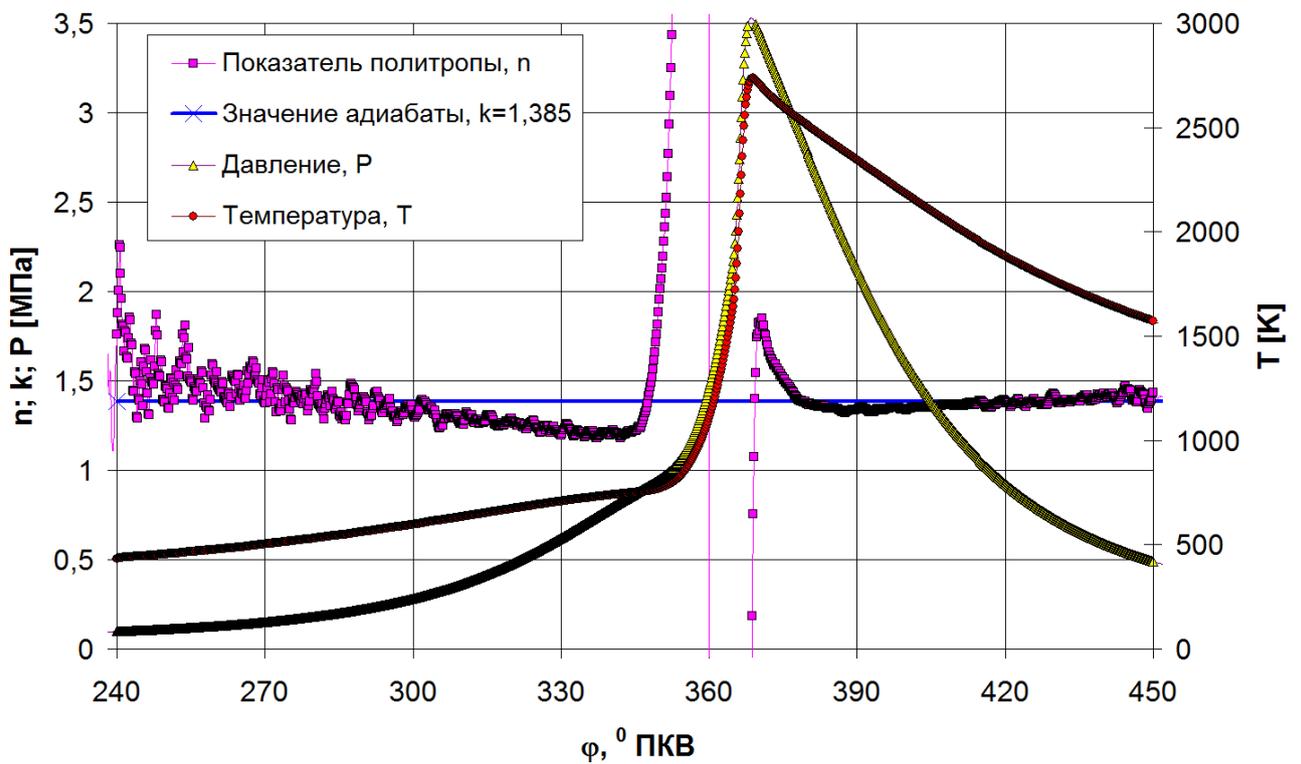
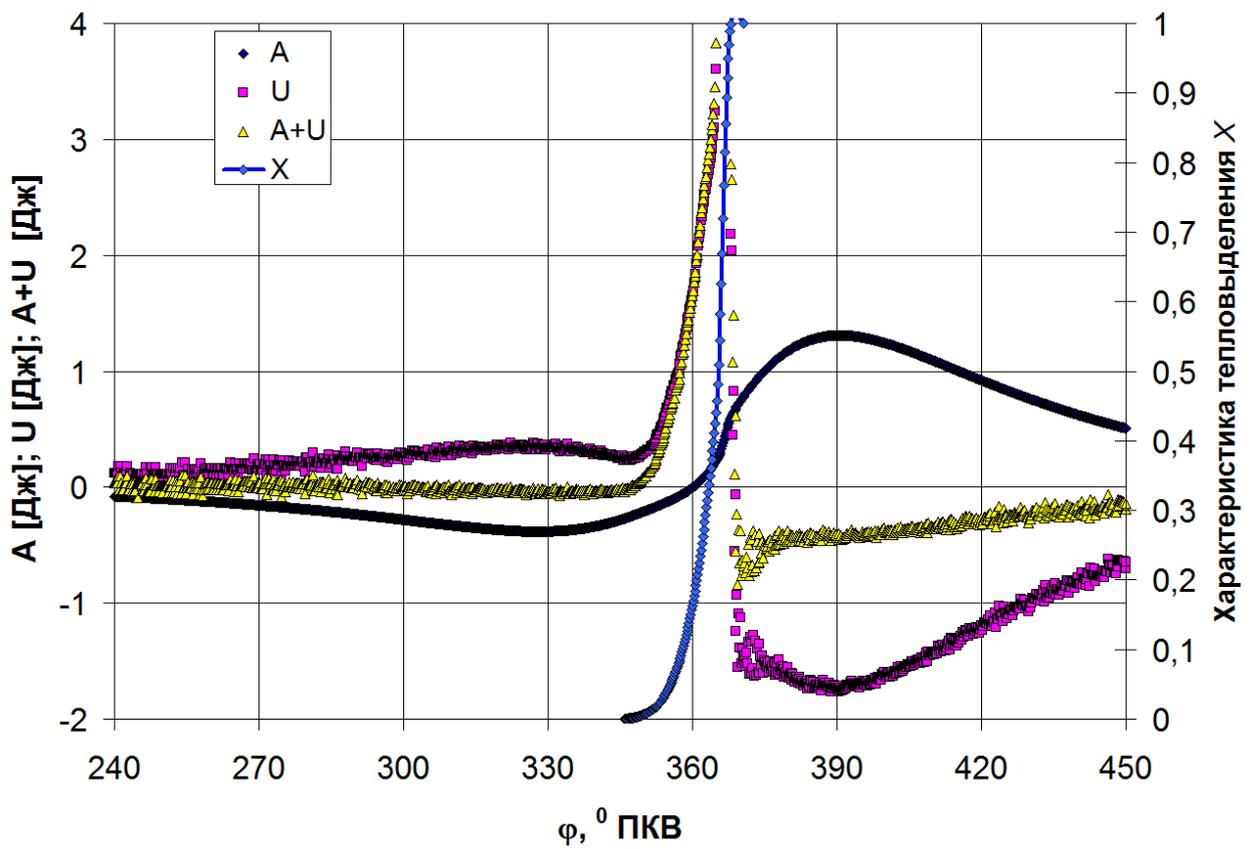


Рисунок 4.3 – Термодинамические параметры без добавки водорода при $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; $\varepsilon = 7$; $\alpha = 1,015$

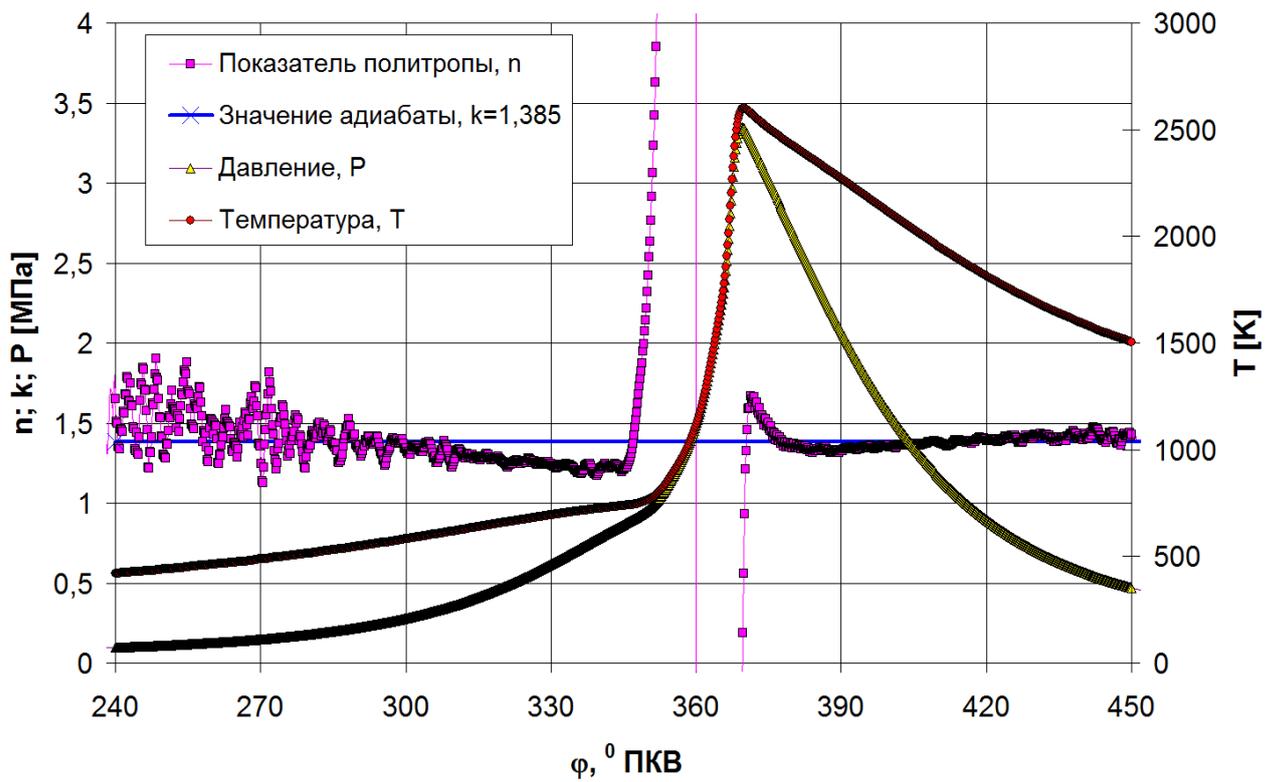
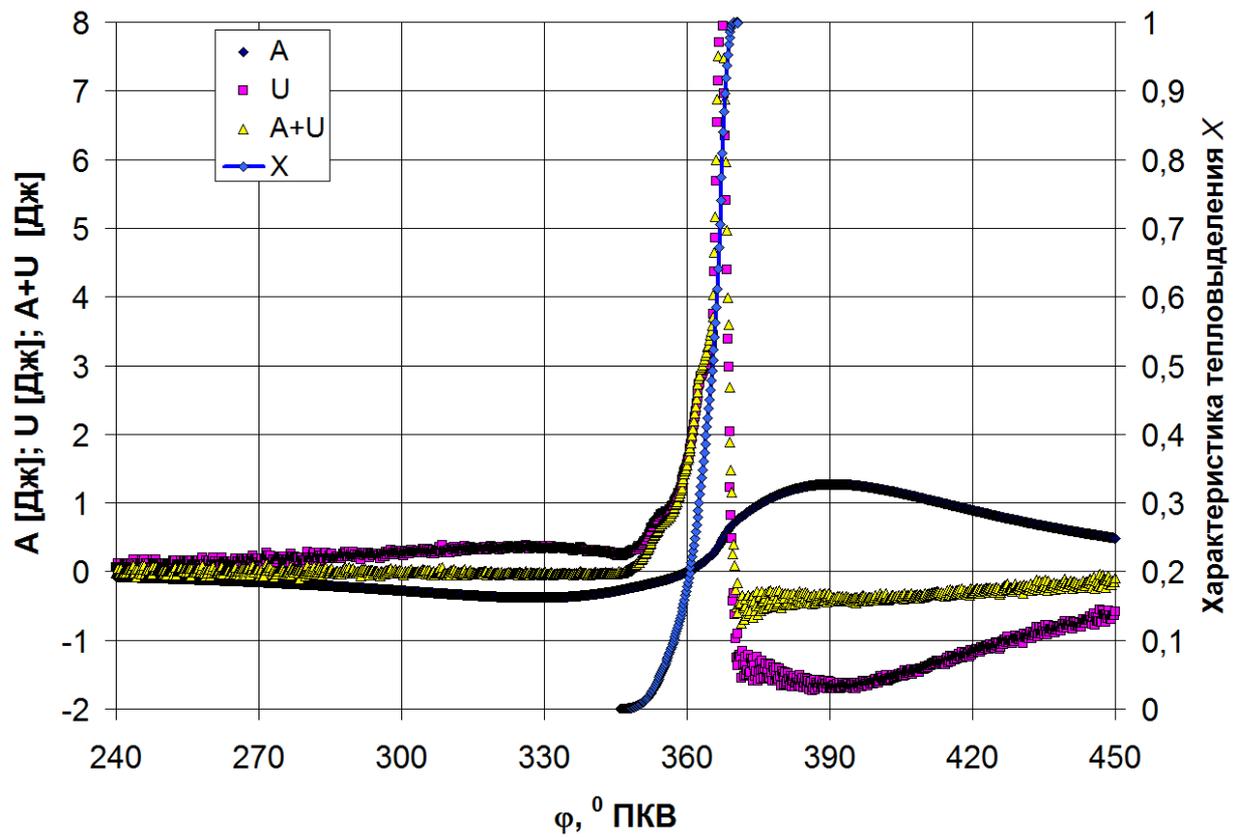


Рисунок 4.4 – Термодинамические параметры при добавке водорода при $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; $\varepsilon = 7$; $\alpha = 1,12$; $H = 3\%$

4.2 Анализ эффективности бензинового ДВС при активации процесса сгорания добавками водорода на примере ВАЗ-2111

Исследование и анализ эффективности бензинового ДВС при активации процесса сгорания добавками водорода на примере ВАЗ-2111 при степени сжатия 9,8. Для примера возьмем последовательность циклов на одном исследуемом режиме, тогда мы получим, что как правило на режиме холостого хода наблюдается троение циклов, то есть имеется один цикл с нормальным сгоранием, второй цикл с пропуском зажигания и третий цикл с активным сгоранием, так как он в составе остаточных газов собрал несгоревшую смесь с прошлого цикла. Это проиллюстрировано на рисунке 4.5 и 4.6, где представлены термодинамические характеристики этих циклов.

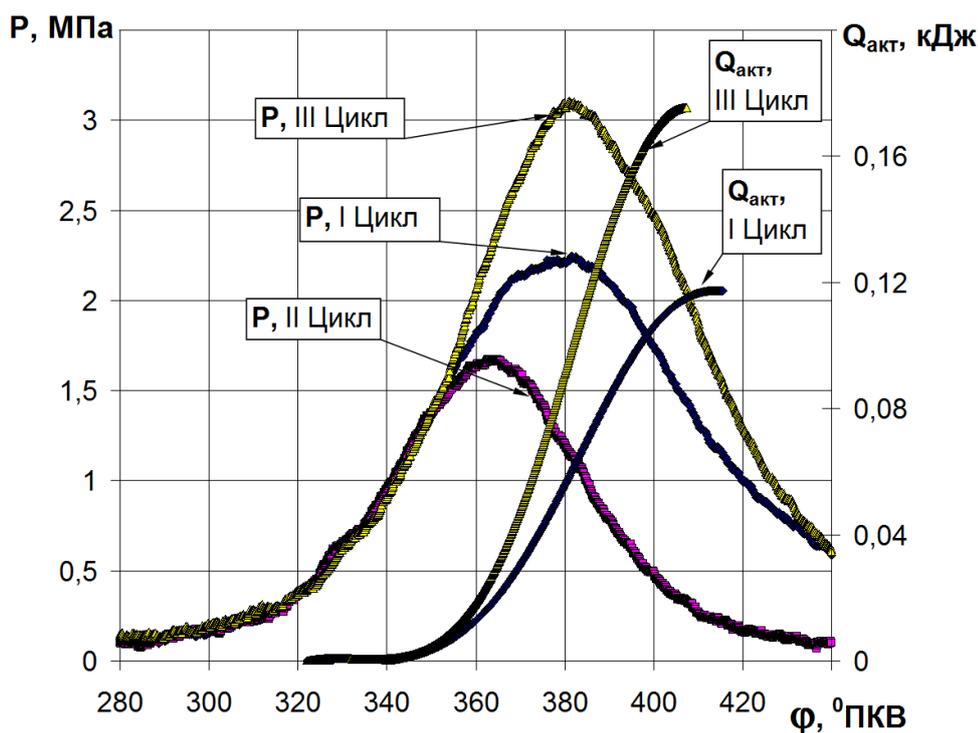


Рисунок 4.5 – Пример развития давления и тепловыделения для трех последовательных циклов при степени сжатия 9,8 и составе смеси $\alpha = 1,0168$

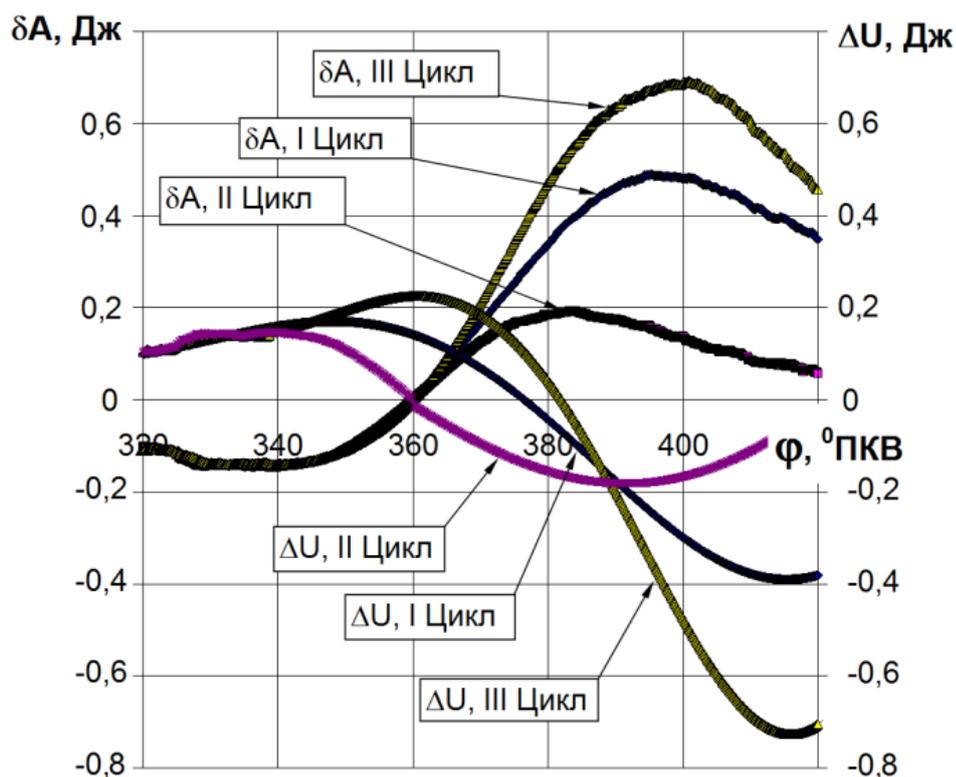
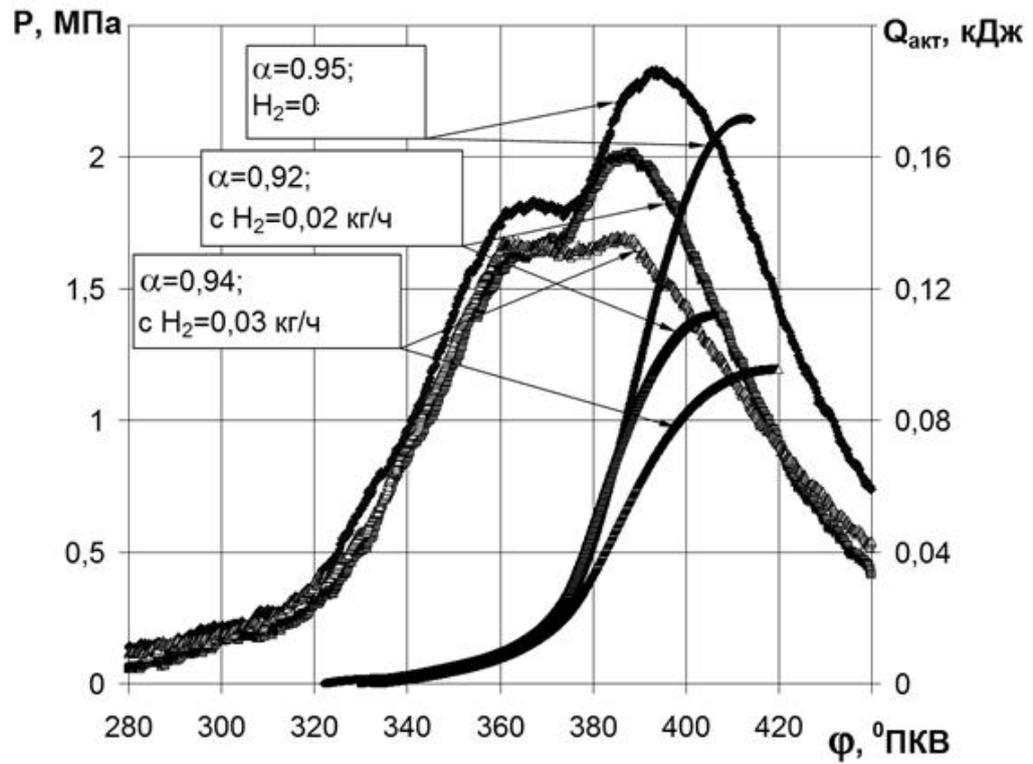
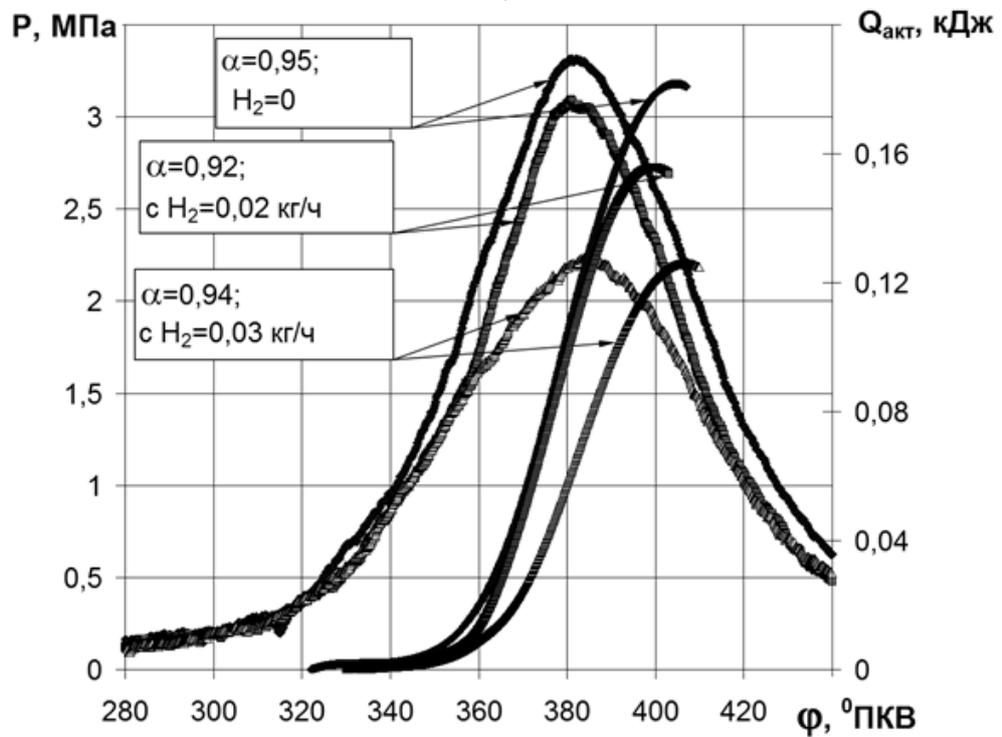


Рисунок 4.6 – Пример изменения работа газа и внутренней энергии для трех последовательных циклов при степени сжатия 9,8 и составе смеси $\alpha = 1,0168$

Водород активизирует процесс сгорания, так исследуя воздействие водорода на протекание процесса сгорания в условиях холостого хода двигателя ВАЗ-2111, были построены графики изменения термодинамических параметров рабочего процесса при изменении количества добавляемого водорода в ТВС (рисунки 4.7, 4.8 и 4.9). Из рисунков 4.7, 4.8 и 4.9 видно, что влияние добавки водорода растет с обеднением смеси, так при $\alpha = 0,95$ водород позволяет только выровнять стабильность процесса сгорания, что обеспечивает худшие условия наполнения в связи с прикрытием дроссельной заслонки, поэтому на рисунке 4.7 мы видим лучшие характеристики процесса сгорания без водорода. Начиная с $\alpha = 1$ водород уже начинает себя проявлять и, как показано на рисунке 4.8 водород помимо повышения стабильности и скорости сгорания он уже имеет соответствующие энергетические характеристики, как и при работе на бензине. А при $\alpha = 1,1$ добавка водорода уже заметно улучшает энергетические параметры процесса сгорания.

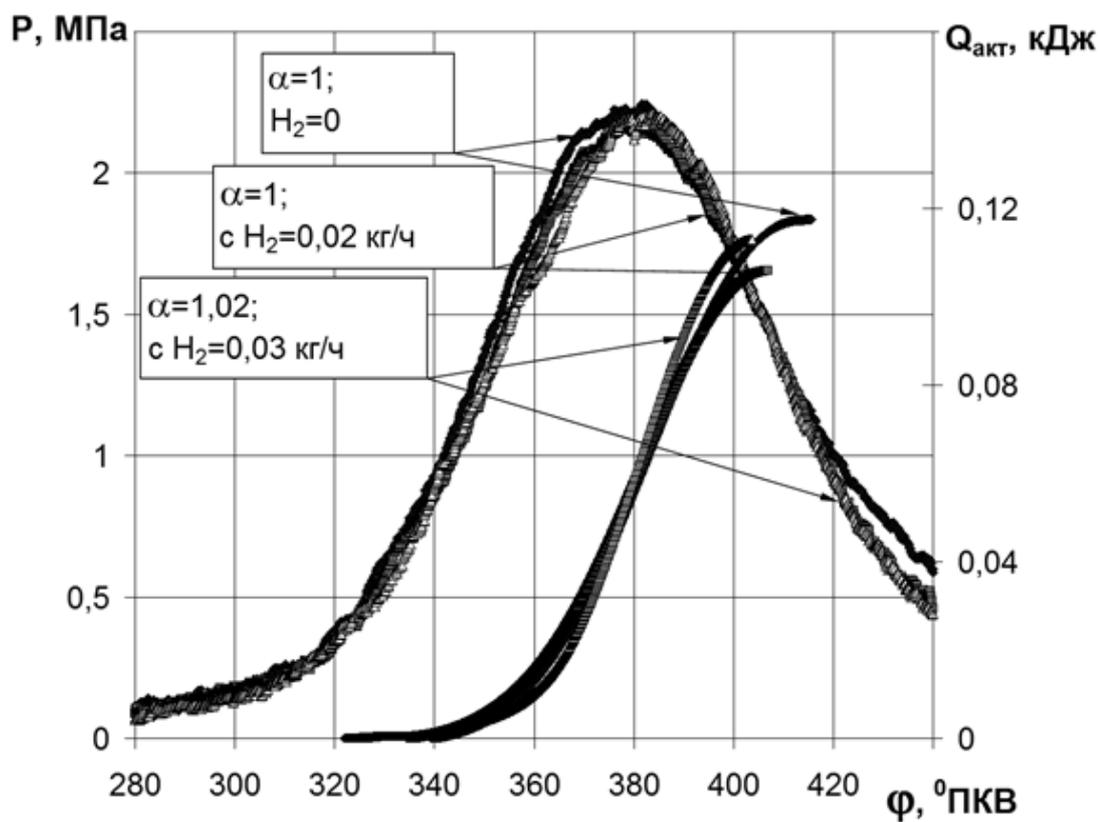


а)

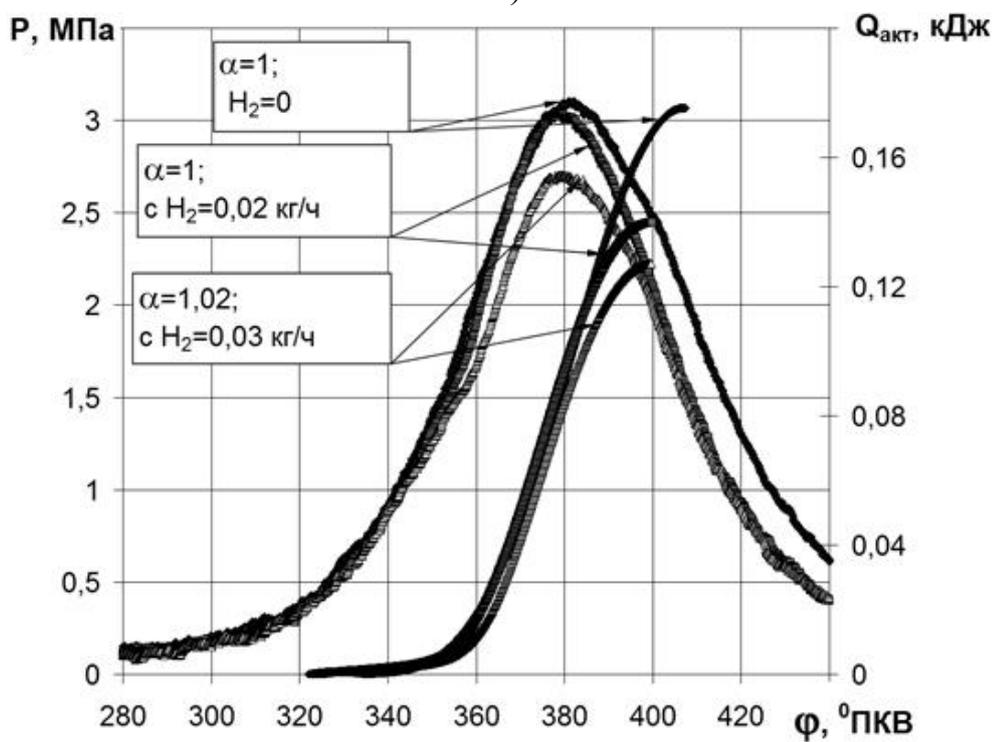


б)

Рисунок 4.7 – Влияние водорода на термодинамические параметры процесса сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,95$: а) в первом цикле, б) в третьем цикле

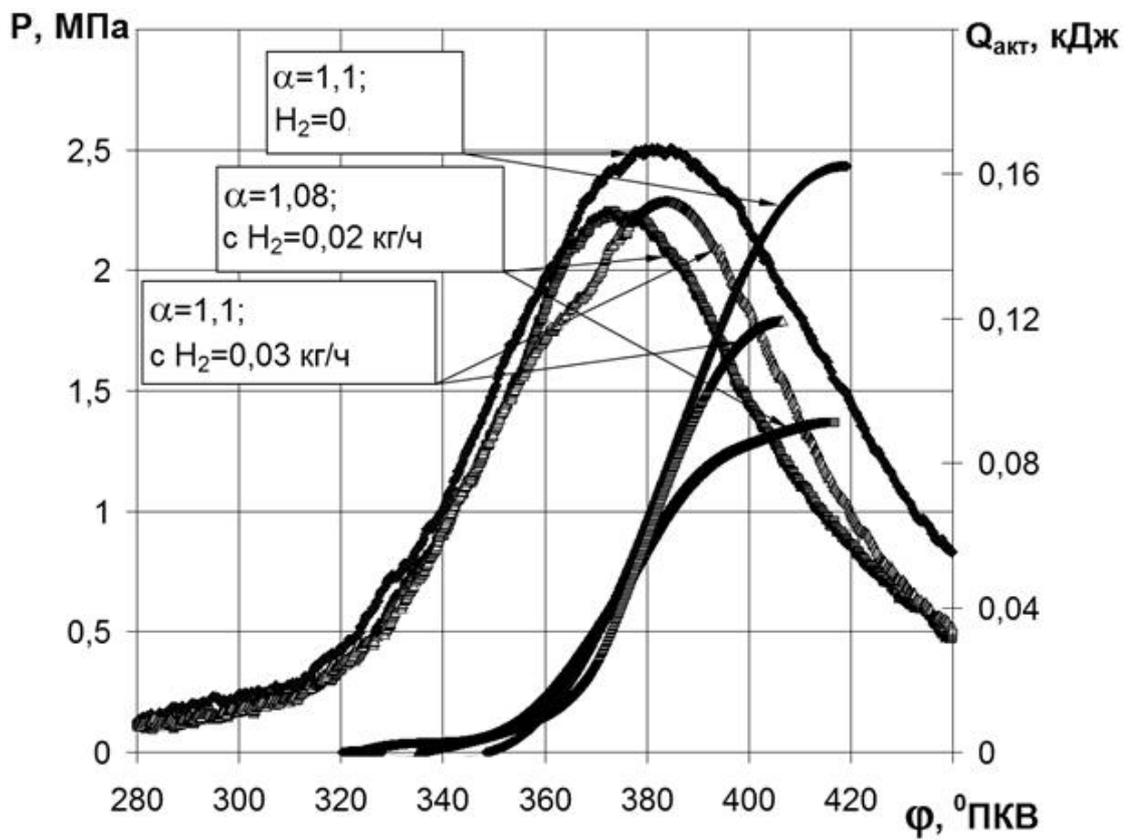


а)

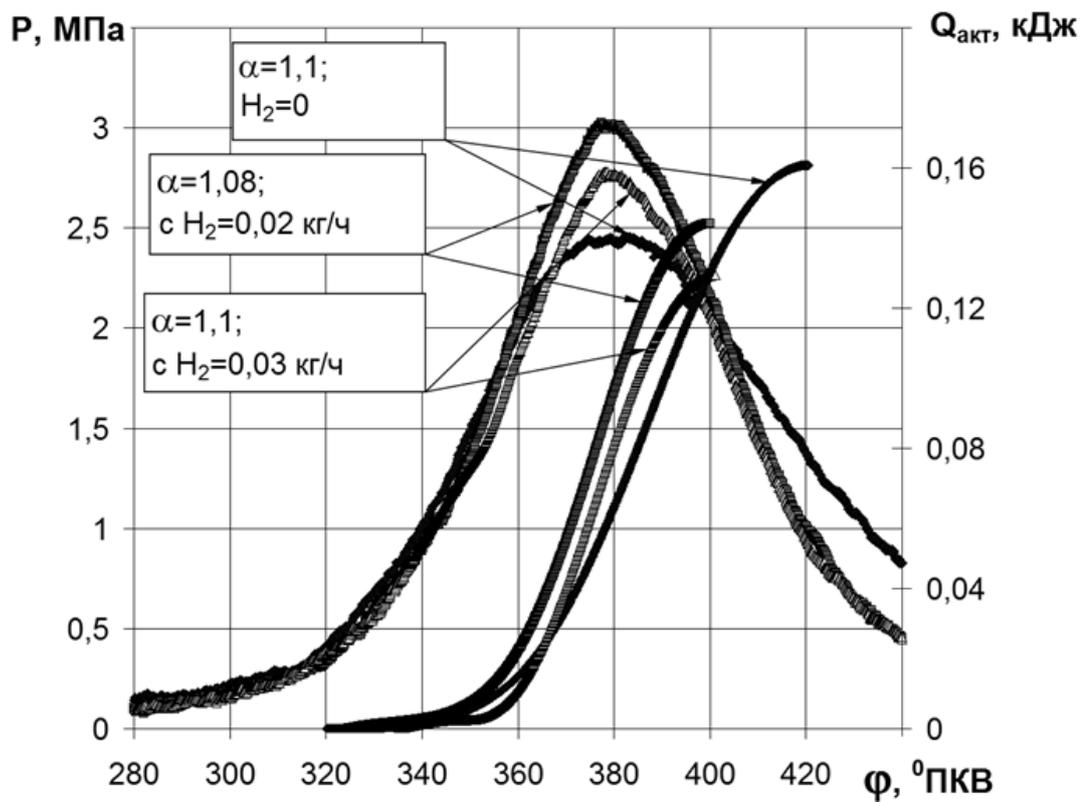


б)

Рисунок 4.8 – Влияние водорода на термодинамические параметры процесса сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$: а) в первом цикле, б) в третьем цикле



а)



б)

Рисунок 4.9 – Влияние водорода на термодинамические параметры процесса сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$: а) в первом цикле, б) в третьем цикле

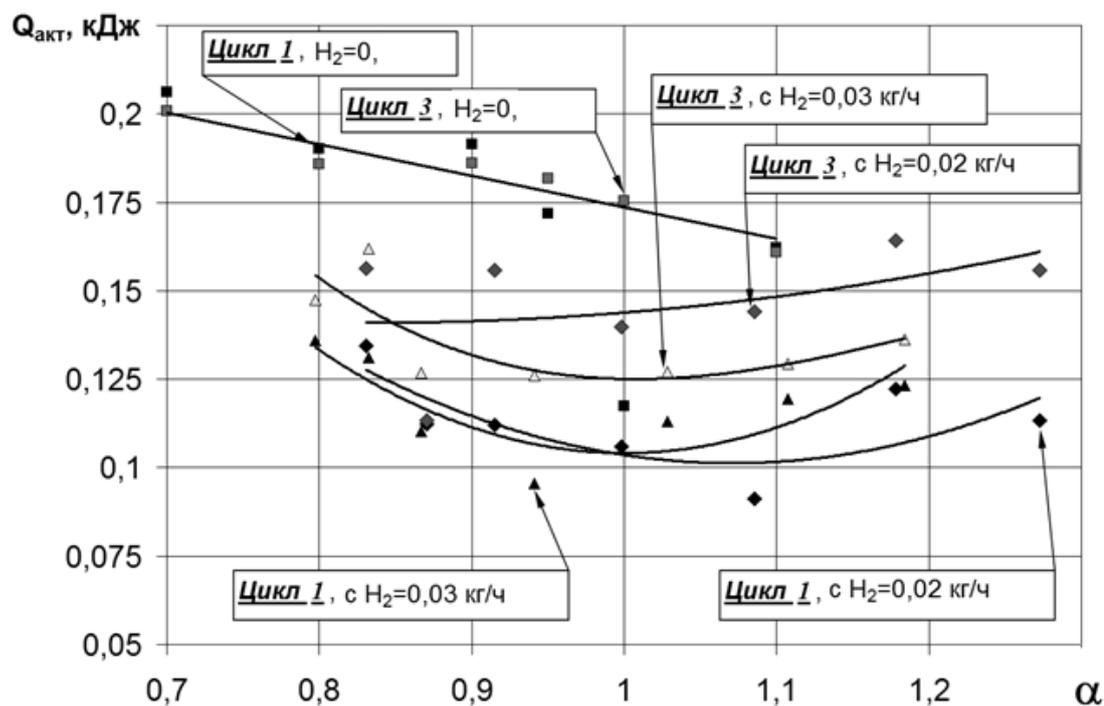


Рисунок 4.10 – Сравнение максимальных значений $Q_{акт}$ в зависимости от α и количества водорода

Анализируя полученные результаты и данные, приведенные на рисунке 4.10 можно выделить четыре зоны, характеризующиеся по качественному составу отработавших газов и эффективностью протекания процесса сгорания. Первая зона: в ней циклы с количеством активно выделившейся энергии менее 0,10 кДж, это циклы после полного сгорания, но за счет добавки водорода в них сформировалась зона горения, которая обеспечивает долю активно выделившейся энергии в размере 0,45 – 0,55 от энергии, введенной с топливом, а с учетом тепловых потерь в стенку это 75 – 85 % полноты окисления топлива. После них следует цикл также с неполным сгоранием до тех пор, пока не произойдет срыв с пропуском зажигания. Вторая зона: в ней циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,10 до 0,12 кДж, это циклы в которых сформировался нормальный фронт пламени, обеспечивающий полное сгорание. Третья зона: это циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,125 до 0,165 кДж, в них

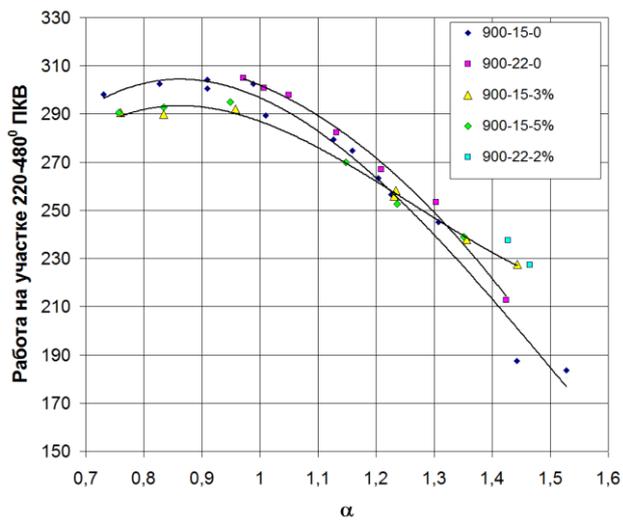
обязательно предшествующий цикл имел пропуск зажигания или неполное сгорание, они характерны при работе на бензине с добавками водорода. Четвертая зона: это циклы с количеством активно выделившейся энергии от 0,16 до 0,21 кДж, это характерно для циклов после полного пропуска зажигания при работе на бензине.

4.3 Выявление возможностей повышения эффективности бензинового ДВС за счет добавки водорода для активации процесса сгорания

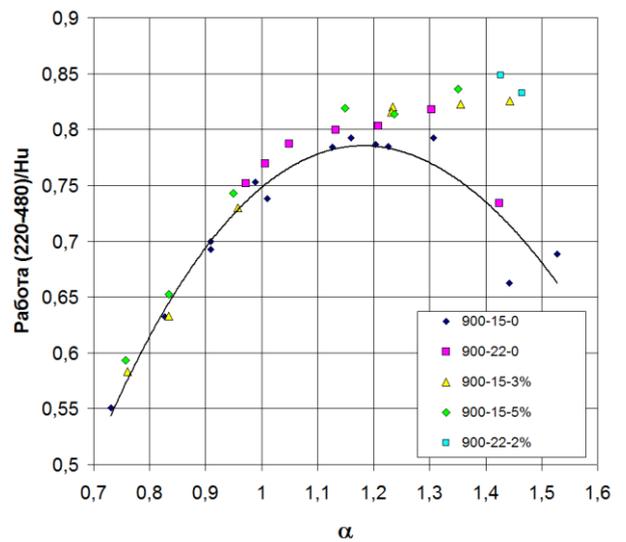
Для выявления возможностей повышения эффективности бензинового ДВС за счет добавки водорода в ТВС был проведен анализ процесса сгорания по его термодинамическим характеристикам. На рисунке 4.11 представлены графики влияния добавки водорода на работу в УИТ-85 при степени сжатия 5,8 и частоте вращения 900 мин^{-1} на участке $220-480^\circ \text{ ПКВ}$ по составу смеси при УОЗ 15 и 22° ПКВ . Видим (рисунок 4.11а) что увеличение доли водорода за счет вытеснения части воздуха на впуске снижает работу на богатых смесях и только при обеднении смеси больше 1,2 добавка водорода позволяет увеличить мощность ДВС.

На рисунке 4.11б приведено отношение работы к введенной в цикл энергией с топливом. Также видим рост удельной эффективности процесса сгорания при добавке водорода в зоне бедных смесей, а на богатых до стехиометрического состава имеет одинаковую эффективность процесса сгорания.

Оценивалось по мимо работы также время (в $^\circ \text{ ПКВ}$) начала (10% рисунок 4.10а), середины (50% рисунок 4.11а) и конца сгорания (90% рисунок 4.10б).



а)



б)

Рисунок 4.11 – Графики изменения работы на участке 220-480° ПКВ (а) и отношения работы к введенной в цикл энергии с топливом (б)

Из графиков (рисунки 4.12 и 4.13а) видим, что эффективными являются процессы у которых время инициации 10% ТВС находится в диапазоне 356 – 363 ° ПКВ. В эту зону как раз попадают почти все исследованные режимы с добавками водорода.

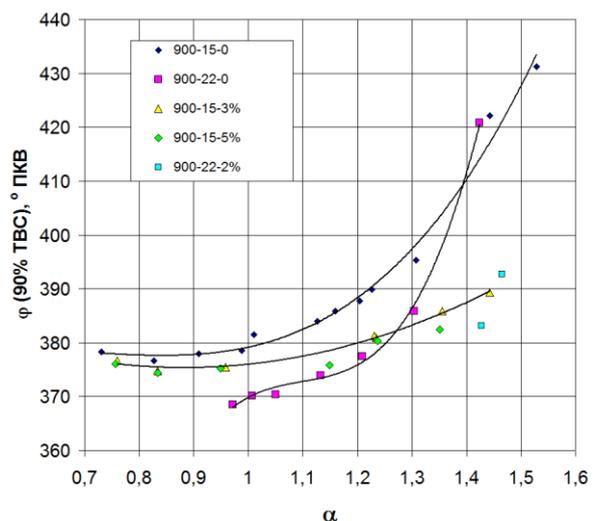
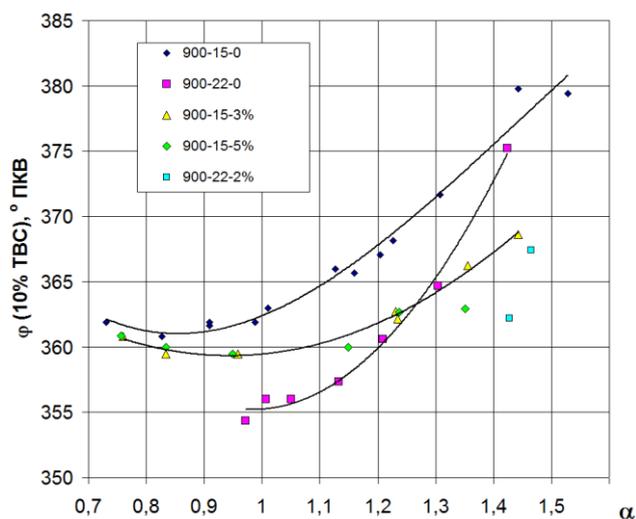


Рисунок 4.12 – Графики времени начала сгорания (10% от массы топлива (а) и конца сгорания (сгорание 90% (б)) по составы смеси

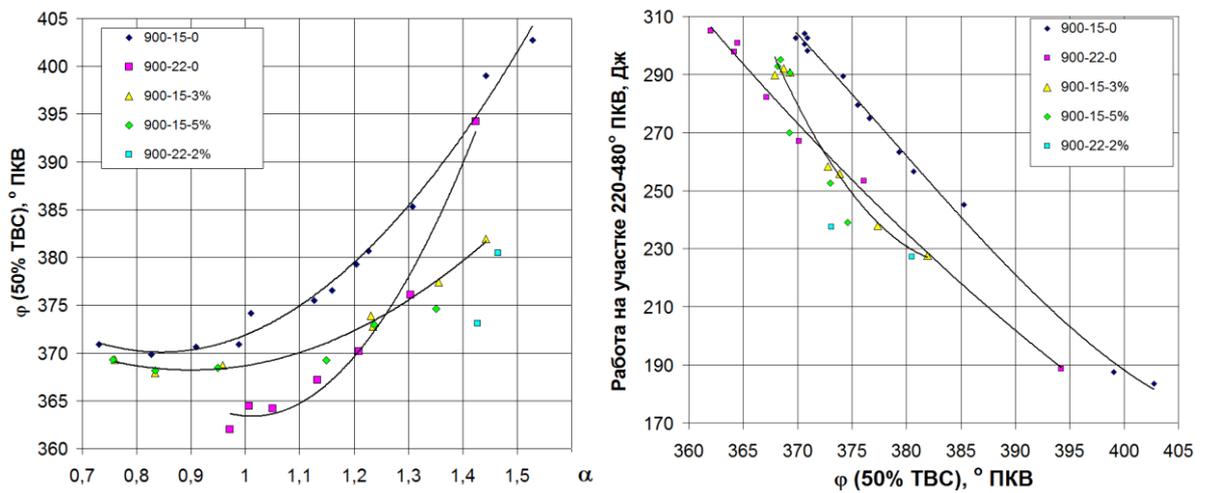


Рисунок 4.13 – Графики времени сгорания 50% от массы топлива по составу смеси (а); и зависимости работы от времени сгорания 50% ТВС (б)

На рисунках 4.13б и 4.14 приведены графики зависимости работы от времени сгорания 10% ТВС (рисунок 4.14а), 50% ТВС (рисунок 4.13б) и 90% ТВС (рисунок 4.14б). Откуда видно, что оптимальным является режим работы, при котором сгорает 10% ТВС находится в диапазоне 355 – 360 ° ПКВ, а для 90% ТВС это 370 – 380 ° ПКВ. И опять видим, что добавка водорода приближает протекание процесса сгорания к оптимальным значениям.

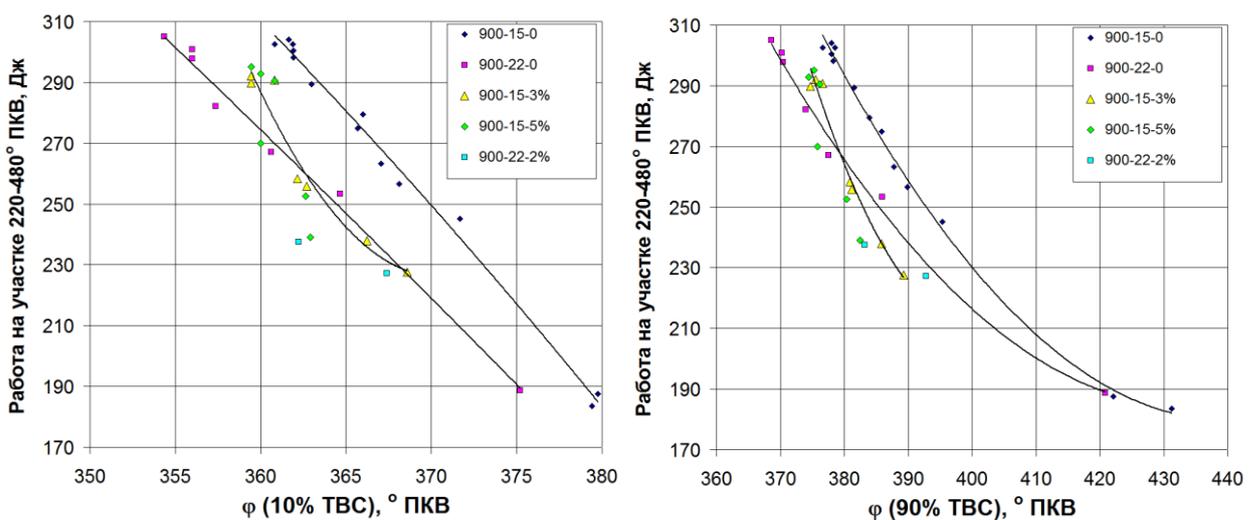


Рисунок 4.14 – Графики зависимости работы от времени сгорания 10% ТВС (а) и 90% ТВС (б)

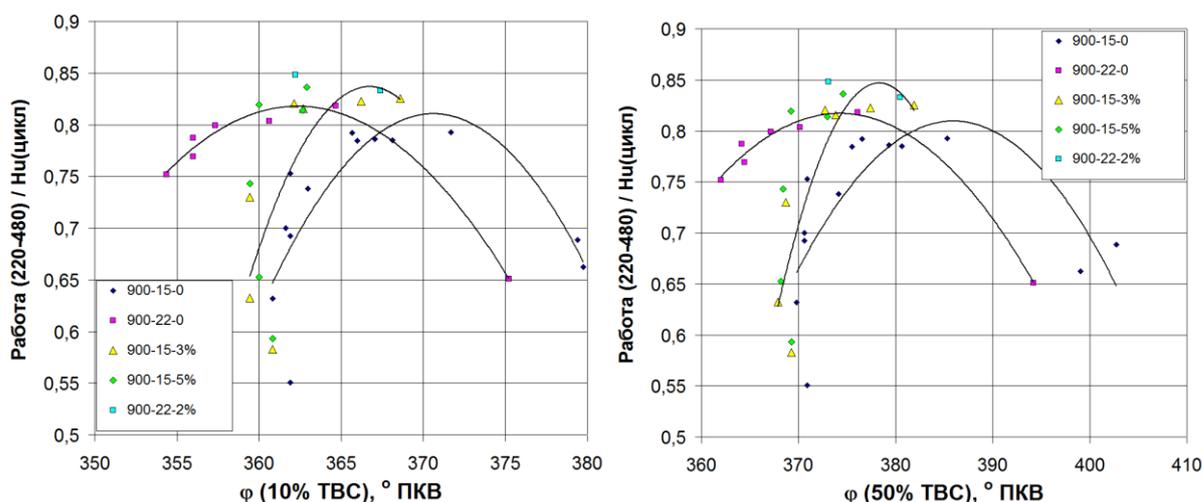


Рисунок 4.15 – Графики отношения работы к введенной в цикл энергии с топливом от времени сгорания 10% ТВС (а) и 50% ТВС (б)

Также помимо зависимости работы от времени сгорания доли ТВС, определены зависимости отношения работы к введенной в цикл энергии с топливом от времени сгорания 10% ТВС (рисунок 4.15а), 50% ТВС (рисунок 4.15б) и 90% ТВС (рисунок 4.16). Из этих рисунков видно, добавка водорода значительно влияет на эффективность процесса сгорания. Так увеличение доли водорода в топливе на 3% приводит к росту термодинамической эффективности, при этом добавка водорода вместе с увеличением УОЗ позволяет получить максимальную эффективность при работе на бедных смесях.

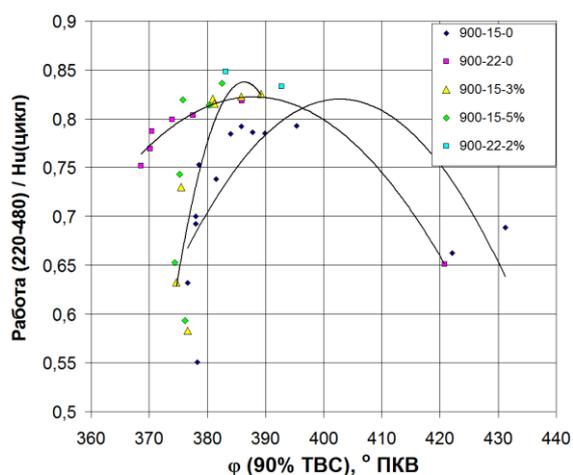


Рисунок 4.16 – Графики отношения работы к введенной в цикл энергии с топливом от времени сгорания 90% ТВС

4.4 Выводы по главе 4 «Выявление возможностей повышения эффективности бензинового ДВС за счет добавки водорода для активации процесса сгорания»

Показано, что термодинамическая эффективность увеличивается при добавке водорода с обеднением смеси, при этом в зоне богатых и стехиометрических составов смеси термодинамическая эффективность незначительно повышается при добавке водорода, но при этом полнота сгорания и скорость сгорания повышаются на всем диапазоне составов смеси. Поэтому применение добавки водорода в бензиновом ДВС с искровым зажиганием особенно эффективно на бедных смесях, но в рамках борьбы за полноту сгорания и снижение токсичности может быть оправданно применяться и при работе на богатых и стехиометрических смесях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы могут быть представлены следующими выводами:

1. Проведена оценка наличия эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС, показано что водород повышает эффективность процесса сгорания и является эффективным активатором горения применительно к бензиновым ДВС только в зоне бедных смесей. Причем чем больше степень обеднения, тем больше значимость добавки водорода.
2. Выявлены возможности повышения эффективности процесса сгорания в бензиновом ДВС с активацией процесса сгорания добавками водорода. Показано что добавка водорода повышает полноту и скорость сгорания, при этом для эффективного применения водорода необходимо проводить грамотную регулировку УОЗ, также добавка водорода повышая скорость сгорания позволяет расширить зону без детонационной работы, что обеспечивает возможность повышения эффективности процесса сгорания при больших степенях сжатия.

Выводы по главе 1

- Проведенный обзор литературы для выявления и оценке эффективности применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС показал, что основные исследования проводились на сильно устаревших двигателях в основном карбюраторных. Редкие исследования проводили оценку эффективности протекания внутрицилиндровых процессов сгорания и тепловыделения. Полученные результаты уже оценивали выходные параметры работы двигателя при добавке в него водород. Приведенные результаты показали

однозначную эффективность применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС

Выводы по главе 2

- Анализ результатов представленных экспериментальных исследований показал преимущества использования систем исследования характеристик работы поршневых ДВС и особенно характеристик распространения пламени углеводородного топлива, основанных на использовании регистрации ионного тока пламени. Указанные системы позволяют непрерывно и безинерционно исследовать и контролировать, а при дальнейшем развитии и управлять различными характеристиками работы ДВС.
- Показано что исследовательская установка УИТ-85, и установка на базе ВАЗ-2111 соответствует задачам проводимых исследований. Установка позволяет с высокой точностью оценивать влияние степени сжатия при сохранении прочих параметров работы двигателя на термодинамические параметры рабочего процесса.
- Предложен подход по определению продолжительности процесса сгорания по изменению показателя политропы в ДВС с искровым зажиганием. Показана достоверность и точность предложенного подхода.

Выводы по главе 3

- Анализ результатов представленных экспериментальных исследований показал перспективы применения добавки водорода для активации процесса сгорания бензиновых ДВС, но при этом следует учитывать высокую эффективность добавки водорода при работе на бедных смесях, и низкую эффективности при работе на богатых и стехиометрических смесях. Это показывает необходимость поиска помимо оптимальных

перспективных топлив ещё и пути снижения токсичности при работе на бедных смесях.

Выводы по главе 4

- Показано, что термодинамическая эффективность увеличивается при добавке водорода с обеднением смеси, при этом в зоне богатых и стехиометрических составов смеси термодинамическая эффективность незначительно повышается при добавке водорода, но при этом полнота сгорания и скорость сгорания повышаются на всем диапазоне составов смеси. Поэтому применение добавки водорода в бензиновом ДВС с искровым зажиганием особенно эффективно на бедных смесях, но в рамках борьбы за полноту сгорания и снижение токсичности может быть оправданно применяться и при работе на богатых и стехиометрических смесях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бортников Л.Н. Особенности горения бензоводородовоздушной смеси в цилиндре поршневого ДВС и определение оптимального соотношения бензин - водород / Л.Н.Бортников // Физика горения и взрыва. -2007. -Т.43, №4.- С.8-14.
2. Бортников Л.Н. Оценка экономических и экологических показателей поршневых ДВС с искровым зажиганием при их работе на смеси «бензин- водород» / Л.Н. Бортников, М.М. Русаков // Автомобильная промышленность. - 2008. -№ 2. - С.12-15.
3. Бортников Л.Н. Экспериментальная и расчетная оценка эффективности применения водорода на автомобиле / Л.Н.Бортников, Д.А.Павлов, М.М.Русаков // Автомобильная промышленность. -2013. -№ 6. - С. 28-33.
4. Галышев Ю. В. Конвертирование рабочего процесса транспортных ДВС на природный газ и водород: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02/ Галышев Юрий Витальевич - СПб., 2010. - 34 с.
5. Гибадуллин В.З. Организация рабочего процесса ДВС с внешним сме-сеобразованием и локальной подачи микродобавок водорода в область межэлектродного зазора свечи зажигания: автореф. дис. .канд. техн. наук: 05.04.02 / Гибадуллин Владимир Заурович. Волгоград, 1992. - 17 с.
6. Гумеров И.Ф. Повышение экономичности двигателя за счет использования добавок водорода к бензину: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.02/ Гумеров Ирек Флорович. -М., 1987. - 21с.
7. Павлов Д.А. Снижение выбросов углеводородов добавкой водорода в топливовоздушную смесь на режимах пуска и прогрева бензинового двигателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02/ Павлов Денис Александрович. -Тольятти., 2005.-193 с.

8. Раменский А. Ю. Исследование рабочих процессов автомобильного двигателя на бензино-водородных топливных композициях: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Раменский Александр Юрьевич. - М., 1981.- 202 с.
9. Талда Г.Б. Повышение топливной экономичности и снижение токсичности бензиновых двигателей добавкой водорода к бензину: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Талда Геннадий Борисович. Харьков, 1984. - 214 с.
- 10.Трелин Ю.А. Исследование особенностей работы ДВС с искровым зажиганием при добавках водорода в бензовоздушную смесь: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Трелин Юрий Алексеевич.- Волгоград, 1981. 26 с.
- 11.Хрипач Н.А. Совершенствование экологических и топливозкономических показателей работы двигателя с принудительным зажиганием применением предварительной термохимической конверсии метанола: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Хрипач Николай Анатольевич.- М., 2004.- 199 с.
- 12.Бортников Л.Н. и др. Альтернативные топлива. Современные вопросы применения водорода в поршневых ДВС. - Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2016. - 159 с.
- 13.Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V., Bobrovskij I. Research of polytropic exponent changing for influence evaluation of actual mixture composition on hydrocarbons concentration decreasing on deep throttling operation // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. №50. Article number 012016
14. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V., Korneev N.V. Increase in the thermodynamic efficiency of the working process of spark-ignited engines on natural gas with the addition of hydrogen // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. №121. Article number 052009

15. Smolenskii V.V., Smolenskaya N.M. Methods for Assessing the Thermodynamic Characteristics of the Combustion Process Using the Indicator Diagram in Spark-Ignition Engines // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. №582. Article number 012003
16. Smolenskaya N., Smolenskii V., Korneev N., Prus Yu. Method for evaluating the parameters of the flame front propagation process according to the indicator diagram in spark ignition engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. №734. Article number 012209.
17. Chintala V., Subramanian K.A. Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis // Energy. 2014. №67. pp. 162–175.
18. Li Y., Jia M., Chang Y., Kokjohn S.L., Reitz R.D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes, Applied Energy, 180 (2016) 849-858. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.038.
19. Zhao Z., Wang S., Zhang S., Zhang F. Thermodynamic and energy saving benefits of hydraulic free-piston engines, Energy, 102 (2016) 650-659. DOI: 10.1016/j.energy.2016.02.018.
20. Sohret Y., Gürbüz H. and Akçay I. H. Energy and exergy analyses of a hydrogen fueled SI engine: Effect of ignition timing and compression ratio, Energy 175 (2019) 410-422 DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.091
21. Siti Sabariah M., et al., Analysis and simulation of combustion and emission on small engine, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 469 (2019) 012076 doi:10.1088/1757-899X/469/1/012076
22. Sezer İ. and Bilgin A. Exergetic Analysis of Using the Gaseous Fuels in Spark Ignition Engines, Thermophysics and Heat Transfer, 28 (2014) No. 2, DOI: 10.2514/1.T4300
23. Irimescu, A., et al., Evaluation of different methods for combined thermodynamic and optical analysis of combustion in spark ignition engines, Energy Conversion and Management 87 (2014) 914–927 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.037>

24. Yuedong Chao et al. / Energy Procedia 158 (2019) 2098–2105 DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.483
25. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V., Korneev N.V. Increase in the thermodynamic efficiency of the working process of spark-ignited engines on natural gas with the addition of hydrogen, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 121 (2018) 052009 doi :10.1088/1755-1315/121/5/052009.
26. Duarte, J., et al., Thermodynamic Analysis of Self- Ignition in Spark-Ignited Engines Operated with Alternative Gaseous Fuels, TECCIENCIA, Vol. 11 No. 20, 57-65, 2016 DOI: <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2016.20.8>
27. Mamalis S., et al., A modeling framework for second law analysis of low-temperature combustion engines, International J of Engine Research 2014, Vol. 15(6) 641–653 DOI: 10.1177/1468087413512312
28. Barjaneh A. and Sayyaadi H. A new closed-form thermodynamic model for thermal simulation of spark ignition internal combustion engines, Energy Conversion and Management 105 (2015) 607–616 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.008>
29. M.M. Krishtal, A.V. Polunin, P.V. Ivashin, E.D. Borgardt and I.S. Yasnikov Changes in the phase composition of oxide layers produced by microarc oxidation on Al–Si and Mg alloys induced by additions of SiO₂ nanoparticles to the electrolyte / Doklady Physical Chemistry. 2016
30. N.M. Smolenskaya and N.V. Korneev Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.
31. N.M. Smolenskaya and V.V. Smolenskii Modelling the average velocity of propagation of the flame front in a gasoline engine with hydrogen additives / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 115 (2018) 012016 doi: 10.1088/1755-1315/115/1/012016.

- 32.D. Panousakis, A. Gazis, J. Patterson and R. Chen, "Analysis of SI combustion diagnostics method using ion-current sensing techniques," SAE Paper. 2006. № 2006-01-1345
- 33.M.M. Krishtal, A.V. Polunin, P.V. Ivashin, E.D. Borgardt and I.S. Yasnikov, "Changes in the phase composition of oxide layers produced by microarc oxidation on Al–Si and Mg alloys induced by additions of SiO₂ nanoparticles to the electrolyte," Doklady Physical Chemistry. 2016
- 34.N.M. Smolenskaya and N.V. Korneev, "Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.
- 35.N.M. Smolenskaya and V.V. Smolenskii, "Modelling the average velocity of propagation of the flame front in a gasoline engine with hydrogen additives," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 115 (2018) 012016 doi: 10.1088/1755-1315/115/1/012016.
- 36.N.M. Smolenskaya, V.V. Smolenskii and N.V. Korneev, "Increase in the thermodynamic efficiency of the working process of spark-ignited engines on natural gas with the addition of hydrogen," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 121 (2018) 052009 doi :10.1088/1755-1315/121/5/052009.
- 37.N.M. Smolenskaya, V.V. Smolenskii and I. Bobrovskij, Research of polytropic exponent changing for influence evaluation of actual mixture composition on hydrocarbons concentration decreasing on deep throttling operation / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 50 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/50/1/012016.
- 38.N.M. Smolenskaya, The electrical conductivity of the flame front, as a characteristic of the rate of heat release and composition of gas fuel in SI engines / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 115 (2018) 012039 doi: 10.1088/1755-1315/115/1/012039.

- 39.A.P. Shaikin and I.R. Galiev Use of Chemi-Ionization to Calculate Temperature of Hydrocarbon Flame / Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2018. T. 63. № 4. p. 612-614.
- 40.A.P. Shaikin and I.R. Galiev, "On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings," Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2016. T. 61. № 8. p. 1206-1208.
- 41.Z. Gao, X. Wu, H. Gao and B. Liu, "Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gasehydrogen blends with BSS de-noising method," International journal of hydrogen energy. 2010. № 35. P. 12918-12929.
- 42.M. Hellring and U. Holmberg, "An Ion current based peak-finding algorithm for pressure peak position estimation," SAE Inc. 1998. № 00FL-587
- 43.Z. Gao, X. Wu, C. Man and X. Meng, "The relationship between ion current and temperature at the electrode gap," Applied thermal engineering. № 33. 2012.
- 44.A. Vressner, A. Hultqvist, P. Tunestal and B. Johansson, "Fuel effects on ion current in an HCCI engine," SAE Paper. 2005. № 2005-01-2093.
- 45.L. Winkler, N. Hegman, C. Raffay and A. Palotas, "Ion current measurements in natural gas flames," European combustion meeting. 2007.
- 46.M. Hellring, T. Munter, T. Rögnvaldsson, N. Wikström, C. Carlsson, M Larsson and J. Nytomt. Robust AFR Estimation Using Ion Current and Neural Networks. SAE 1999-01-1161
- 47.A. Saitzkoff, R. Reinmann, F. Mauss and M. Glavmo In-Cylinder Pressure Measurements Using the Sparg Plug as an Ionization Sensor. SAE 970857
- 48.E.A. VanDyne, C.L. Burcmyer, A.M. Wahl and A.E. Funaioli Misfire Detection from Ionization Feedback Utilizing the Smartfire Plazma Ignition Tecnology. SAE 2000-01-1377
- 49.Auzins J., H. Johansson and J. Nytomt Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock, and Engine Control. SAE 950004

50. Smolenskaya N.M. and Korneev N.V. Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.
51. Вибе И.И., Тепловой расчёт двигателей внутреннего сгорания / И.И. Вибе // Челябинск.: Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, 1972. - с.282
52. Улыбышев, К.Е. Расчёт влияния постоянного электрического поля на газодинамику и эмиссию окислов азота в ламинарном диффузионном пламени / К.Е. Улыбышев // МЖГ. №1, 2000. - С.55-71.
53. Проскурин, В.Ф. Цепно-тепловой взрыв и степень ионизации водородовоздушного пламени / В.Ф. Проскурин, П.Г. Бережко, Е.Н. Николаев, В.Н. Тараканов, П.Е. Половинкин, А.Г. Лещинская // Физика горения и взрыва. 2005. № 1. С.15-23.
54. Сеначин, П.К. Моделирование процесса горения гомогенной смеси в двигателе с искровым зажиганием / П.К. Сеначин, М.А. Ильина, Д.Д. Матиевский, М.Ю. Свердлов // Тез. XII симпозиума по горению и взрыву, 11-15 сентября 2000 г. Черноголовка: РАН, 2000.-ч.3. - с.155-157.
55. Daniels, C. F. The comparison of mass fraction burned obtained from the cylinder pressure signal and spark plug ion signal / SAE paper № 980140, 1998.
56. Eriksson, L. Requirements for and a systematic method for identifying heat release model parameters. Modeling of SI and Diesel Engines / SAE Paper № 980626, 1998.
57. Franke, A. Employing an ionization sensor for combustion diagnostics in a lean burn natural gas engine / A. Franke, P. Einewall, B. Johansson, R. Reinmann // SAE paper № 2001-01-0992, 2001.

- 58.Frenklach, M. GRI-Mech / M. Frenklach, T. Bowman, G. Smith, B. Gardiner // entnommen am 18.06.2009, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/. 2009.
- 59.Grill, M. Objektorientierte Prozessrechnung von Verbrennungsmotoren / M.Grill // Stuttgart, Universität, Dissertation. 2006a.
- 60.Gülder, Ö. L. Turbulent Premixed Combustion Modelling using Fractal Geometry / Ö.L. Gülder // in: 23. Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute. 1990.
- 61.Herdin, G. Emissionsproblematik bei Biogasmotoren / G.Herdin // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007.
- 62.Heywood, J. B. Fluid Motion Within the Cylinder of Internal Combustion Engines - The 1986 Freeman Scholar Lecture / J. B. Heywood // Journal of Fluids Engineering Vol. 109 / 3. 1987.
- 63.Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals / J. B. Heywood// New York: McGraw-Hill. 1988.
- 64.Hiroyasu, H. Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber / H. Hiroyasu, T. Kodata // SAE Paper 740715. 1974.
- 65.Huiming, Z. Investigation on the Combustion Characteristics of the Compression Ignition Divided Chamber Combustion System of the Natural Gas Engine / Z. Huiming, Z. Defu, Z. Qingping // in: CIMAC Congress. Wien. 2007.
- 66.Jobst, J. Simulation von Zündverzug, Brennrate und NOx-Bildung für direktgezündete Gasmotoren / J. Jobst, F. Chmela, A. Wimmer // in: 1. Tagung Motorprozesssimulation und Aufladung. Berlin. 2005.
- 67.John, A. Entwicklung und Erprobung eines zweistufigen Impaktors zur Messung alveolengängiger Quarzfeinstaubemissionen und Durchführung von Validierungsmessungen / A. John, H. Kaminski, T. Kuhlbusch // Duisburg, IUTA e.V., Bericht. 2004.
- 68.Kettner, M. Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Optimierung der Entflammung von mageren Gemischen bei Ottomotoren

- mit Direkteinspritzung / M. Kettner // Karlsruhe, Universität, Dissertation. 2006.
- 69.Klimstra, J. The road to obtain the ultimate performance of gas engines - opportunities and challenges / J. Klimstra // in: 5. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau. 2007.
- 70.Kogler, G. Potential of HCCI for large natural gas fueled engines / G. Kogler, A. Wimmer // in: CIMAC Congress. Wien. 2007.
- 71.Kolb, T. Experimentelle und theoretische Untersuchung zur Minderung der NOx-Emission technischer Feuerungen durch gestufte Verbrennungsführung / T. Kolb // Karlsruhe. Technische Hochschule, Dissertation. 1990.
- 72.Kozuch, P. Ein phänomenologisches Modell zur kombinierten Stickoxid- und Rußberechnung bei direkteinspritzenden Dieselmotoren / P. Kozuch // Stuttgart, Universität, Dissertation. 2004.
- 73.Kuhlmann, R. M. V. Improvement of a Model for Calculation of Oxides of Nitrogen Emissions from Spark Ignition Engines / R.M.V. Kuhlmann, J. R. Sodre // SAE-Paper 2004-01-3001. 2004.
- 74.Lämmle, Ch. Numerical and Experimental Study of Flame Propagation and Knock in a Compressed Natural Gas Engine / Ch. Lämmle // Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation. 2005.
- 75.Liao, S. Y. Determination of laminar burning velocities for natural gas / S. Y. Liao, D. M. Jiang, Q. Cheng // Fuel 83 (2004). Elsevier. Science Direct. 2004.
- 76.Merker, G. Technische Verbrennung - Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse / G. Merker, Ch. Schwarz // Stuttgart: Teubner. 2001.
- 77.Noske, G. Ein quasidimensionales Modell zur Beschreibung des ottomotorischen Verbrennungsablaufes / G. Noske // Düsseldorf: VDI Verlag. 1988.