

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 Экспериментальный анализ влияния водорода на характеристики
сгорания природного газа

Обучающийся Х.А. Худобердиев
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский
(ученая степень, ученое звание, Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Изучение литературы для выявления перспективы применения добавки водорода в компримированный природный газ в автомобильных силовых установках	6
1.1 Получение водорода и развитие водородной инфраструктуры	6
1.2 Применение сжатого природного газа, обогащенного водородом, в двигателях внутреннего сгорания	9
1.3 Исследование горения в двигателе с искровым зажиганием при добавлении водорода в метановоздушную смесь	11
1.4 Добавка водород в дизельные двигатели внутреннего сгорания	14
1.5 Применение добавки водорода для интенсификации процесса сгорания бензиновых ДВС	23
1.6 Способы исследования процесса сгорания в двигателях с искровым зажиганием.....	27
Глава 2 Описание экспериментального оборудования	31
Глава 3 Обзор результатов экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа с добавкой водорода в двигателе ВАЗ-2111 при подаче топлива во впускной трубопровод	35
Глава 4 Обзор результатов экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа с добавкой водорода в исследовательской установке УИТ-85 при подаче топлива во впускной трубопровод.....	42
4.1 Анализ характеристик электропроводности.....	42
4.2 Анализ скорости сгорания при работе исследовательской установки на смеси природного газа и водорода.....	50
4.3 Оценка возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа при добавке водорода.....	58
Заключение.....	62
Список используемых источников.....	64

Введение

Актуальность работы и научная значимость настоящего исследования.

Метан как топливо становится все более и более интересным для применения в двигателях из-за все более строгих правил по выбросам загрязняющих веществ и парниковых газов, а также требований рынка как для мобильных, так и для стационарных приложений. Использование метана позволяет сократить выбросы оксидов азота, сажи и CO_2 при сгорании по сравнению с дизельным топливом и бензином и потенциально может повысить эффективность за счет повышения детонационной стойкости. Биогенные источники и преобразование избыточной электроэнергии из возобновляемых источников в метан на электростанциях, работающих на газе, могут дополнительно улучшить баланс CO_2 и дать метану долгосрочную перспективу. Дополнительное повышение эффективности и дальнейшее снижение склонности к детонации, а также минимизация выбросов оксидов азота за счет снижения пиковой температуры могут быть достигнуты за счет работы на обедненной смеси и/или рециркуляции отработавших газов. Повышенное содержание инертного газа снижает реакционную способность смеси, в сочетании с высокой молекулярной стабильностью метана и более высокими давлениями в момент зажигания это приводит к значительному повышению требований к системам зажигания газовых двигателей. Это может привести к нежелательным ошибкам и большим колебаниям от цикла к циклу. Водород, с другой стороны, имеет очень высокую реакционную способность, более широкий диапазон воспламеняемости и гораздо более высокую скорость ламинарного потока. Смеси метана и водорода могут расширить эксплуатационные пределы, чтобы обеспечить еще более эффективные рабочие концепции с меньшим выбросом CO_2 .

Поэтому исследование перспектив применения добавки водорода в сжатый природный газ в автомобильных силовых установках является актуальной темой магистерской диссертации.

Объект исследования.

Автомобильная силовая установка.

Предмет исследования.

Применения добавки водорода в сжатый природный газ в автомобильных силовых установках.

Целью работы является изучение перспектив применения добавки водорода в сжатый природный газ в автомобильных силовых установках.

Гипотеза исследования состоит в том, что водород обеспечивает чистое и эффективное сгорание в ДВС.

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

1. провести обзор проблемных источников и наработать материал для изучения перспектив применения добавки водорода в сжатый природный газ в автомобильных силовых установках;
2. выявить возможности улучшения характеристик двигателя легкового автомобиля за счет применения добавки водорода в сжатый природный газ.

Методы исследования.

Метод аналитического исследования, метод моделирования рабочего процесса, метод экспериментальных исследований.

Научная новизна исследования заключается в идее повысить эффективность двигателя легкового автомобиля за счет применения добавки водорода в сжатый природный газ.

Личное участие автора состоит в том, что автор принимал непосредственное участие в формировании аналитического обзора по

направлению исследований, а также в разработке модели для исследования и анализе результатов моделирования данных и полученных на основании их 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 2021, 2022 и 2023 г.
- международная научно-практическая конференция «Наука, образование, общество», Россия, г. Тамбов, 30 апреля 2022 г.
- опубликована одна научная статья: Смоленский, В.В. Анализ токсичности бензинового двигателя по результатам моделирования двигателя ВАЗ-21129 / Смоленский В.В., Петросян М.Ф., Худобердиев Х.А., Чеснакова Е.В., Гумяров Ш.Р., Нахратова Е.В. // Научный альманах 2021 · N 4-2(90). С.55-59

На защиту выносятся:

1. анализ перспектив применения добавки водорода в компримированный природный газ в автомобильных силовых установках;
2. возможности повышения эффективности двигателя легкового автомобиля за счет применения добавки водорода в компримированный природный газ в автомобильных силовых установках.

Структура магистерской диссертации.

Диссертации состоит из введения, 4 глав, заключения с основными результатами и выводами, содержит 41 рисунка, 2 таблицы, списка использованных источников (86 источник). Основной текст изложен на 72 страницах.

Глава 1 Изучение литературы для выявления перспективы применения добавки водорода в сжатый природный газ в автомобильных силовых установках

1.1 Получение водорода и развитие водородной инфраструктуры

Производство ветровой и солнечной энергии во многих промышленно развитых странах за последние десятилетия значительно выросло. Установленная мощность ветряных электростанций в Германии увеличилась с 1990 по 2017 год с 55 МВт до 55,8 ГВт, а пиковая мощность солнечной энергии с 2 МВт до 42,4 ГВт за тот же период времени, в результате чего общий объем производства в 2017 году составил 106,6 ГВтч. и 39,9 ГВтч соответственно [2]. Для Швейцарии за 2017 год сообщалось об общей мощности ветровой и солнечной энергии 75 МВт и 1664 МВт·ч с соответствующим производством 132 ГВтч и 1683 ГВтч соответственно [3]. Швейцарская энергетическая стратегия до 2050 г. прогнозирует к 2050 г. дополнительно установленные мощности ветровой энергии на уровне 1,3–4,2 ТВт·ч и солнечной энергии на уровне 5,8–11 ТВт·ч [4]. Технически ветровая и солнечная энергия относятся к классу колеблющихся производителей энергии в зависимости от положения солнца и погодных условий. Таким образом, производство электроэнергии происходит независимо от мгновенного фактического спроса и должно быть подключено к сети с производителями и потребителями, которые могут контролировать и уравнивать эти колебания, чтобы обеспечить стабильность сети. Когда к власти подключаются большие доли изменчивых возобновляемых источников, может возникнуть перепроизводство или избыток электроэнергии.

Power-to-gas (P2G) — технологический вариант преобразования избыточной электроэнергии в газообразные химические энергоносители. Возобновляемая избыточная электроэнергия используется для расщепления

воды в электролизере на кислород и водород, которые могут быть непосредственно использованы в топливном элементе или преобразованы в метан с помощью процесса Сабатье с CO_2 и H_2 . Газообразный химический энергоноситель, обычно водород и/или метан, может подаваться в газовую сеть или в хранилища для последующего потребления. Сеть природного газа хорошо развита в Европе, и разнообразная сеть соединяет Европу с основными поставщиками газа в России.

Проект «Возобновляемые источники энергии в будущем энергоснабжении» (RENERG2) был основан на новой швейцарской энергетической стратегии с активным развитием производства электроэнергии из возобновляемых источников, при этом в центре внимания находилось не само производство энергии, а химическое хранение изменяющегося избыточного возобновляемого электричества. и его использование, не забывая при этом о других технологиях хранения, таких как батареи, сжатый воздух, гидроаккумулирующие электростанции и другие. Проект сосредоточился на важнейших ключевых аспектах и проблемах будущей цепочки преобразования энергии в газ, а именно электролизе, метанировании, смешивании водорода и КПГ и инфраструктуре, а также применениях обогащенного водородом сжатого природного газа (HCNG) в мобильности и децентрализованное производство тепла и электроэнергии, как показано на рисунке 1. Он финансировался Центром компетенций по энергетике и мобильности (CCEM), исследовательским сообществом в рамках Швейцарского федерального технологического института (ETH) с видением более устойчивой швейцарской энергетической системы.

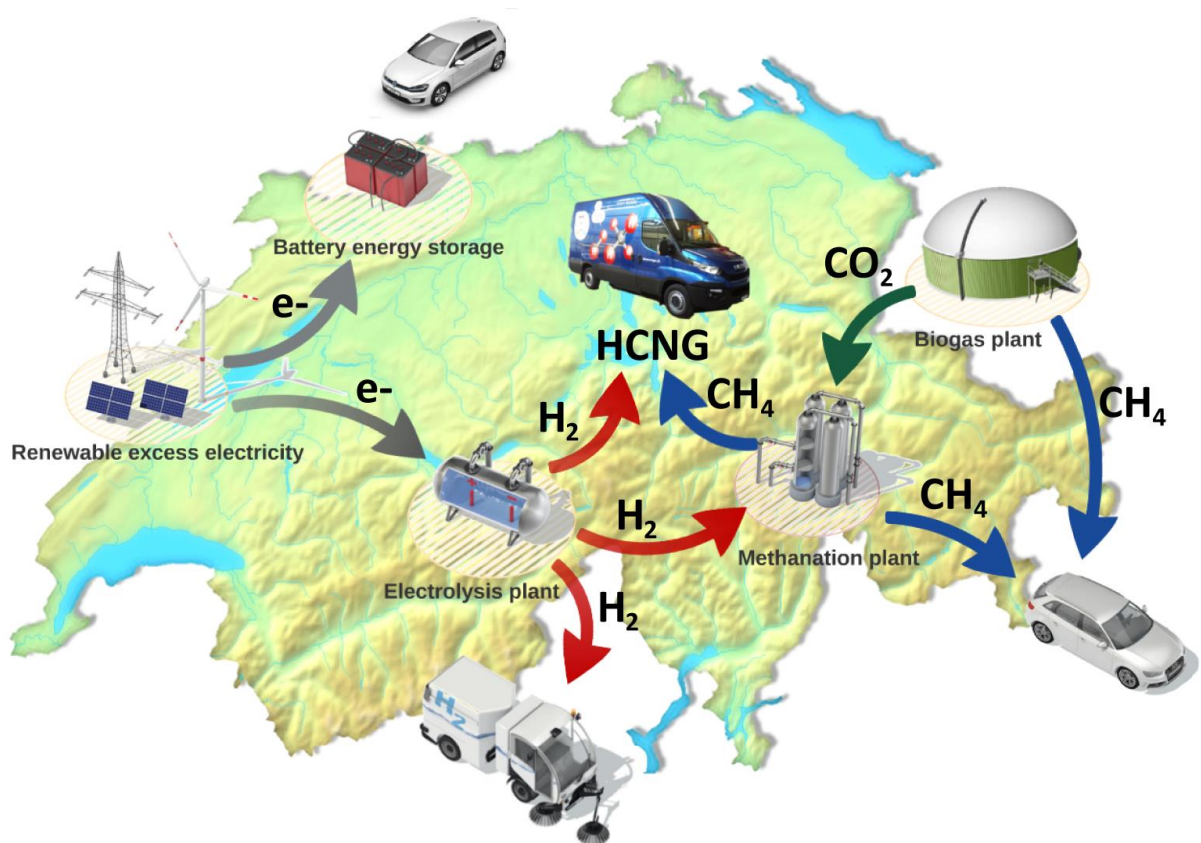


Рисунок 1 – Схематическая иллюстрация преобразования энергии в газ в связи с потенциальными приложениями для обеспечения мобильности с использованием метана или метана, обогащенного водородом, в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания или прямого использования водорода в топливных элементах.

Смеси водорода с метаном на установках P2G — это один из способов объединить преимущества этих двух газов для использования возобновляемых видов топлива в двигателях внутреннего сгорания. Даже чистый ископаемый метан имеет то преимущество, что позволяет снизить выбросы CO₂ в выхлопных газах более чем на 20% по сравнению с легковыми автомобилями, работающими на бензине, просто из-за более высокого отношения H/C. Добавляя чистый водород к метану, это соотношение можно еще больше увеличить, чтобы еще больше снизить баланс выбросов CO₂. Ограничение выбросов CO₂ напрямую связано с эффективностью двигателя и использованием возобновляемых видов топлива. Такие концепции, как уменьшение размеров, гибридизация, непосредственный впрыск, рециркуляция отработавших газов, работа

двигателя с послойным наддувом и наддув, в настоящее время являются обычной практикой разработчиков двигателей для дальнейшего повышения экономии топлива. Такие двигатели ближе к пределам механической конструкции и, следовательно, более подвержены детонации и отклонениям в процессе сгорания. Двигатели с искровым зажиганием часто страдают от значительной межцикловой изменчивости (CCV) процесса сгорания, что влияет на экономию топлива, характеристики выбросов и увеличивает нагрузку на двигатель. Понимание природы и происхождения этих CCV, которые приводят к высоким пиковым давлениям и детонации, является одной из предпосылок для будущей конструкции двигателя. Хотя эти колебания давления могут быть легко обнаружены датчиками детонации, которые в настоящее время являются важной частью стратегии управления двигателями с искровым зажиганием, причины до сих пор полностью не изучены. Высокая изменчивость быстрых и медленных циклов горения особенно характерна для двигателей КПП из-за сравнительно медленной скорости метана, который составляет основную долю в составе природного газа. Кроме того, эти новые концепции двигателей приводят к более высоким уровням давления в цилиндрах, более сильному изменению состава смеси во времени и пространстве и в целом к более строгим граничным условиям для системы зажигания. Водород, который имеет почти в семь раз более высокую скорость ламинарного потока по сравнению с метаном при стандартных условиях, в смеси с метаном может способствовать установлению менее строгих рабочих ограничений и расширению пределов работы на обедненных смесях.

1.2 Применение сжатого природного газа, обогащенного водородом, в двигателях внутреннего сгорания

Двигатели, работающие на природном газе, работающие на обедненной смеси [64] и/или с непосредственным впрыском [65], особенно

привлекательны тем, что улучшают тепловую эффективность и используют более низкие выбросы CO_2 по сравнению с бензиновыми и дизельными двигателями. Метан имеет несколько преимуществ, таких как меньшая склонность к самовоспламенению (более высокая детонационная стойкость), хорошая объемная теплота сгорания, экономическая конкурентоспособность и широкая доступность. Более высокая детонационная стойкость метана позволяет увеличить степень сжатия по сравнению с современными бивалентными двигателями. Но это также влияет на требования к системе зажигания из-за более высоких давлений в момент зажигания, что приводит к увеличению требований к сопротивлению изоляции катушки и свечи зажигания. Это делает условия для успешного инициирования горения более сложными.

Обогащение водородом компримированного природного газа или метана при стехиометрической и обедненной работе в двигателях с впрыском топлива с портовым впрыском показало более высокий тепловой КПД [66, 67, 68, 69, 70], снижение выбросов несгоревшего углеводородного сырья [66, 68, 71], увеличение первичных выбросов оксидов азота (NO_x) [66, 71, 72], сокращение продолжительности горения [66, 71, 72], уменьшение колебаний от цикла к циклу [41, 43, 44] и увеличение тепловые потери стенки [72, 75]. Все эти исследования проводились на термодинамических двигателях.

Исследования оптических двигателей с использованием сжатого природного газа, обогащенного водородом, или водорода, смешанного с метаном, проводятся редко. Скалла [33] исследовал смешение воздуха и топлива во впускном коллекторе при 4, 10, 25 и 50 об.% примеси водорода к метану. Он определил скорость распространения амина в оптической машине с помощью OH^* -хемилюминесценции и лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) с индикатором (триметиламином) и обнаружил, что повышенная реакционная способность смеси из-за примеси водорода ответственна за более стабильное распространение амина, снижающее колебания от цикла к циклу. Более того, уже в самый ранний наблюдаемый

момент (ядро 5 мм) он обнаружил сильно промотированные пламена при обогащении водородом 10, 25 и 50 об.%. Тем не менее детальные исследования перехода от искрового ядра к раннему ядру в области обогащенного водородом метана до сих пор отсутствуют.

1.3 Исследование горения в двигателе с искровым зажиганием при добавлении водорода в метановоздушную смесь

Добавление водорода к смеси метан/воздух было экспериментально изучено Halter et al. [35], Ильбас и соавт. [36], Mandilas et al. [37], Tahtouh и соавт. [38], Fairweather et al. [39], Ху и соавт. [30, 31] в ламинарных условиях. Было показано, что добавление водорода приводит к общему увеличению скорости ламинарного потока и уменьшению (положительного) сгоревшего числа Маркштейна, которое зависит, среди прочего, также от отношения эквивалентности, давления и температуры, делая скорость ламинарного потока менее подверженной влиянию за счет эффекта растяжения. Содержание водорода в топливе 60 % об. и выше приводит к отрицательному числу Маркштейна, усиливая эффекты растяжения в положительную сторону, т. е. увеличивая локальную скорость пламени. Здесь следует отметить, что число Маркштейна по существу является выражением термодиффузионных неустойчивостей, хотя могут быть важны и гидродинамические. Более высокие скорости ламинарамида были связаны с более высокой доступностью радикалов H, O и OH в зоне реакции при добавлении водорода к метану, тогда как выбросы альдегидов могут быть снижены из-за более низких значений CH_2O и CH_3CHO Wang et al. [12], Ху и соавт. [11]. Численный прогноз ламинарной скорости движения с использованием механизма химической реакции GRI 3.0 Smith et al. [3], показали в целом хорошее совпадение с измеренными значениями в широком диапазоне содержания водорода и коэффициента эквивалентности Ren et al. [14], Halter et al. [105], Ху и соавт. [1], Ван и соавт. [2]. Однако следует

отметить, что диапазон зарегистрированных данных для водородно-метановых примесей не превышает 0,9 МПа и 500 К, что оставляет несколько открытым вопрос об обосновании и применимости механизмов реакции в условиях двигателя внутреннего сгорания.

Используя турбулентную горелку Бунзена, работающую при давлении до 0,5 МПа, Halter et al. [15] выявили увеличение отношения $sT = sL$ с увеличением добавки водорода для исследованных обедненных условий. Мандилас и др. [7], Fairweather et al. [10] использовали сосуд с вентиляторной мешалкой при первоначальном давлении 0,1 МПа и температуре 360 К. Они обнаружили значительное увеличение скорости турбулентного горения только при содержании водорода более 10 об.%. На отношение $sT = sL$ для константы u_0 добавление водорода лишь слабо повлияло. Отношение $sT = sL$ тем больше увеличивалось с увеличением содержания водорода, чем беднее становилась смесь. Такое поведение было приписано тому, что постные куры были менее чувствительны к скорости растяжения, на что указывали более низкие значения Ma_{sr} .

Добавление водорода к метану (или природному газу, основным компонентом которого является метан) для работы двигателей SI широко исследовано в литературе. Обзор можно найти в Akansu [10]. Основные выводы заключаются в том, что добавление водорода, даже в небольших количествах, позволяет снизить специфичные для тормозов выбросы углеводородов, CO и CO₂ на выходе из двигателя, в то время как NO_x увеличивается при постоянном коэффициенте эквивалентности из-за повышения температуры сгорания Swain et al. [16], Cattelan и Wallace [17], Collier et al. [18], Карим и соавт. [19], Ларсен и Уоллес [20], Шудо и соавт. [12], Bauer and Forest [22], Akansu et al. [23], Кахраман и соавт. [24]. Предел обедненного сгорания СПГ расширен водородом из-за более широких пределов воспламенения и более высокой реактивности Raman et al. [25], Карим и соавт. [11], Дас [26]. Это позволяет уменьшить штраф за увеличение выбросов NO_x за добавление водорода при постоянном коэффициенте

эквивалентности, за счет того, что двигатель в целом работает на обедненной смеси, чем это было бы возможно без водорода. Другой возможностью уменьшить увеличение является замедление продвижения искры без значительного ухудшения теплового КПД Shudo et al. [21], Ван и соавт. [27]. В Dimopoulos et al. [28] использование рециркуляции выхлопных газов (EGR) в сочетании с добавлением водорода показало существенное снижение выбросов NOx. В зависимости от конфигурации двигателя с точки зрения степени сжатия, коэффициента эквивалентности и момента зажигания добавление водорода может привести к увеличению теплового КПД за счет увеличения скорости горения, что позволяет уменьшить опережение зажигания, а также максимальное повышение давления, приближающееся к ВМТ Karim et al. [19], Ларсен и Уоллес [20], Шудо и соавт. [21], Bauer and Forest [22], Dimopoulos et al. [28], Кахраман и соавт. [24]. Повышение эффективности может привести к увеличению общей выходной мощности, несмотря на более низкую объемную теплотворную способность H₂. Устойчивость к детонации метана сохраняется при небольших количествах добавки водорода, которая ухудшается только при значительном содержании. Karim et al. [19]. В Shrestha and Karim [29], Wang et al. [27] был сделан вывод, что для исследованных условий бедной смеси содержание водорода в водородно-метановых смесях в пределах от 20 до 25 об.% по объему дает оптимум с точки зрения прироста мощности и предотвращения детонации, в то время как Dimopoulos et al. [28] заявили, что дополнительный прирост эффективности маловероятен выше 15 об.% для исследованных условий низкой нагрузки. Совсем недавно измерения с помощью оптически доступного двигателя DI SI были представлены в Di Iorio et al. [130]. Результаты соответствовали предыдущим наблюдениям, а оптические данные свидетельствовали об увеличении скорости распространения света наряду с более равномерным распространением.

На межцикловые вариации (CCV) процесса горения, характеризуемые коэффициентом дисперсии указанного среднего эффективного давления

COVIMER, влияет добавка водорода. В Ма и соавт. [131], Ван и соавт. [132] было показано, что добавление водорода приводит к уменьшению COVIMER для всех моментов зажигания, отстающих от момента максимального момента торможения (МВТ). Было обнаружено, что благотворное влияние водорода на ССV больше при более высоких оборотах двигателя. Уменьшение дисперсии скорости выделения тепла при увеличении добавления водорода было показано Reyes et al. [133]. В то время как более высокие отношения EGR приводят к более высоким циклическим колебаниям, Huang et al. [134] продемонстрировали возможность добавления водорода для уменьшения колебаний, так что рабочие пределы EGR могут быть расширены.

В то время как экспериментальные исследования двигателей SI, работающих на водород-метане, довольно обширны, исследования CFD в рамках геометрии двигателей SI встречаются редко. Модель горения в контексте RANS была предложена Rakopoulos et al. [135] для сжигания чистого водорода в двигателях SI и последовательно расширена для примесей водорода-метана в Kosmadakis et al. [136, 137]. Модель горения основана на турбулентном закрытии скорости потока, предложенном Zimont, Lipatnikov и Chomiak Zimont et al. [138], Липатников и Хомяк [139], Зимонт [140]. Ламинарная скорость движения топливной смеси рассчитывается на основе правила Ле Шателье, для которого корреляции для чистого метана и водорода, предложенные Уиметтом и Сирсом [141] и Герке и др. [142], соответственно. Показано хорошее совпадение с экспериментальными данными для рассматриваемого содержания водорода 10 и 30 об.%.

1.4 Добавка водород в дизельные двигатели внутреннего сгорания

В настоящее время тепловые системы должны стать энергоэффективными и производить меньше выбросов. Дизельные двигатели являются одной из таких систем, которые необходимо улучшить в этом

отношении. Ожидается, что в ближайшем будущем водород станет одним из наиболее важных видов топлива для сокращения выбросов парниковых газов. Этот вклад, основанный на характеристиках обоих видов топлива, дает представление о возможности повышения мощности дизельных двигателей и снижения выбросов за счет добавления водорода.

Дизельные двигатели характеризуются выбросами оксидов углерода, оксидов азота, сажи и твердых частиц. В соответствующей литературе показано, что введение водорода для частичной замены заряда дизельного топлива повысит производительность двигателя [1]. В основном это помогает снизить выбросы оксидов углерода вследствие оптимизированных характеристик смеси благодаря газообразному состоянию водорода. Другие исследователи использовали Computational Fluid Dynamics для изучения изменений в выбросах оксидов азота при сгорании дизельного топлива, обогащенного водородом, в различных условиях эксплуатации. Их результаты подтверждают, что наблюдается заметное снижение выбросов выхлопных газов с увеличением процентного содержания водорода [2]. Другие авторы приводят пример измерения давления в цилиндрах водородно-дизельной системы. Полученные данные свидетельствуют о нормальном сгорании дежурного топлива без предварительного зажигания и сжигания предварительного смешения. Но давление имеет тенденцию к резкому повышению, так как водород с высокой температурой самовоспламенения воспламеняется после предварительного зажигания дизеля. Это позволяет использовать водород без серьезной модификации уже установленных на борту дизелей [3]. В другом исследовании [4] рассматривалось сжигание обедненной смеси с использованием водородного топлива. Результат этого вклада указывает на то, что водород помогает оптимизировать процесс сгорания, что позволяет значительно расширить предел обедненной смеси за счет улучшения предела пропусков зажигания. Кроме того, он показывает, что колебания от цикла к циклу уменьшаются благодаря лучшему смешиванию и более быстрому сгоранию. Другое

исследование, представленное в [5], относится как к сгоранию чистого водорода в условиях воспламенения от сжатия однородного заряда, так и к сгоранию водород-дизель в двигателе с воспламенением от сжатия. Различные дозы водорода используются для получения информации о влиянии на интенсивность детонации при сгорании, массовую долю сжигаемого топлива и скорость выделения тепла, а также на долговечность двигателя. Представленные результаты показывают, что до семнадцати процентов водорода могут оказывать положительное влияние на производительность. Экспериментальные исследования [6]-[9] были нацелены на влияние использования водорода на параметры двигателя, такие как момент впрыска, максимальная тепловая эффективность тормозов и оксиды азота. В нем делается вывод о том, что водород с впрыском через порт помогает повысить тепловую эффективность торможения двигателя при большем снижении выбросов.

В настоящем вкладе производительность дизельного двигателя рассматривается с использованием добавления водорода и на основе моделирования двигателя среднего значения, ориентированного на улучшение мощности и выбросов. Газообразный водород вводится во впускной коллектор с использованием доступных методов заправки газом. Концепция основана на непрерывном впрыске во впускной коллектор, где центральный дозирующий клапан и распределитель подают испаренный водород во впускные каналы. Для этого тепло охлаждающей жидкости двигателя используется для испарения водорода и регулирования его температуры. Подача относительно низкотемпературного газообразного водорода во впускной коллектор способствует охлаждению свежего заряда, что увеличивает плотность заряда и помогает снизить выбросы двигателя. Бедная смесь предотвращает обратный выброс во впускные каналы. Дизельное топливо впрыскивается непосредственно в камеру сгорания с использованием современных технологий заправки топливом с небольшими изменениями для уменьшения расхода дизельного топлива, которое будет

заменено потоком водородного топлива [10]. Сгорание смеси осуществляется за счет сжигания дизельного топлива, учитывая, что водородная смесь относительно очень бедная и превышает предел пропусков зажигания в двигателях, работающих по циклу Отто. Таким образом, можно предположить, что горение водорода синхронизировано с дизельным. Захваченная энергия топлива сравнивается для диапазона нагрузок и концентраций. Анализ и экспериментальные результаты дают четкое представление о предполагаемой возможности частичного и экономичного улучшения производительности дизельных двигателей за счет частичного добавления водорода при частичных нагрузках.

1.4.1 Свойства водорода

Водород не имеет запаха, цвета и не образует вредных выбросов при сжигании с кислородом [64]. Водород используется в топливных элементах, где топливо преобразуется в чистую энергию посредством электрохимической реакции, преобразующей химическую энергию водорода и окислителя в электричество [64]. С другой стороны, этот метод является очень затратным процессом и нуждается в развитии.

Водород можно получить из нефти и воды. В последнее время большая часть водорода (95%) производится методами, основанными на ископаемом топливе [64]. Низкая плотность газообразного водорода является серьезной проблемой, связанной с пространством для хранения, необходимым для питания автомобиля с разумным расстоянием вождения. Кроме того, низкая плотность способствует снижению плотности энергии в цилиндре, что приводит к низкой выходной мощности. Снижение расхода топлива может быть достигнуто с обедненной смесью, поскольку диапазон воспламеняемости водорода обеспечивает диапазон топливно-воздушных смесей) [64].

1.4.2 Влияние водорода на двигатель CI

Несколько исследований касались влияния водорода только в двигателях с воспламенением. Хоман и др. [15] обнаружили, что работа

двигателя CI только с водородом была ограничена из-за высокой устойчивости водорода к самовоспламенению. Это не было решено даже при высокой степени сжатия. Некоторые авторы рекомендовали использовать свечи накаливания, а свечи зажигания с многократным зажиганием можно использовать для облегчения сгорания водорода. Однако большинство исследований показывают, что использование водорода в качестве более привлекательного метода использования водорода в двигателях с воспламенением от перегрева. Это связано с тем, что низкая температура самовоспламенения дизельного топлива может преодолеть сопротивление самовоспламенению водорода [14].

Варде и Фрейм [16] экспериментально исследовали возможность снижения содержания твердых частиц в результате аспирации небольших количеств водорода. В целом, концентрация дыма снизилась при частичной нагрузке, тогда как при высокой нагрузке она была незначительной. Было обнаружено, что оптимальное процентное содержание водорода для уменьшения дыма составляет от 10% до 15% в расчете на энергию. Было также отмечено, что выбросы ВОУ не подвергались влиянию фумигации водорода. Однако уровни NOx увеличивались с увеличением количества водорода.

Поведение выбросов NOx при сгорании водородно-дизельного топлива было изучено Lilik et al. [17]. Количество водорода, впрыскиваемого во всасываемый воздух, составляло до 15% в расчете на энергию. Они заметили, что дизельное топливо приводит к более высоким уровням NOx. В частности, уменьшение выбросов NO и увеличение выбросов NO₂, при этом выбросы NO₂ становятся доминирующим компонентом NOx в некоторых режимах горения, как показано на рисунке 2.

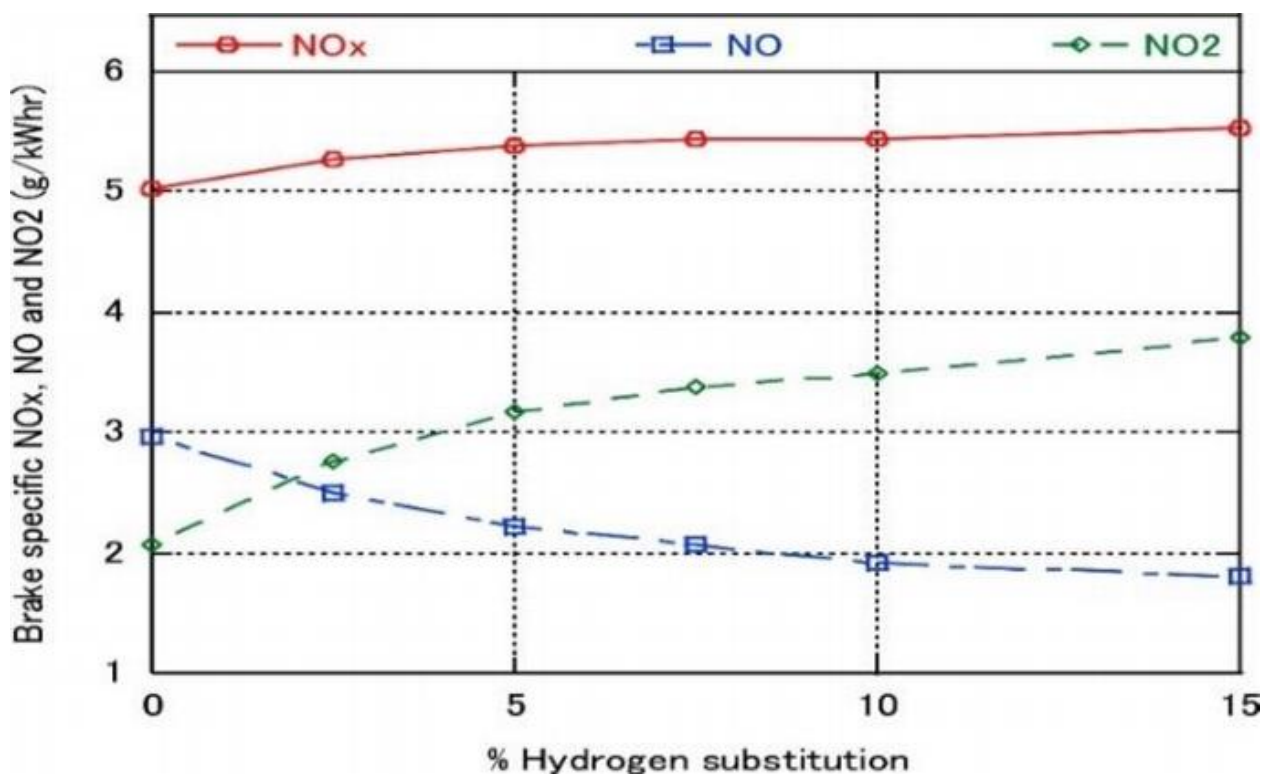
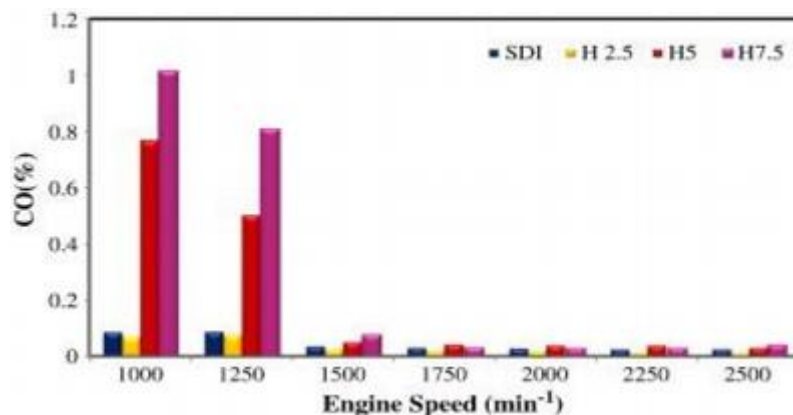


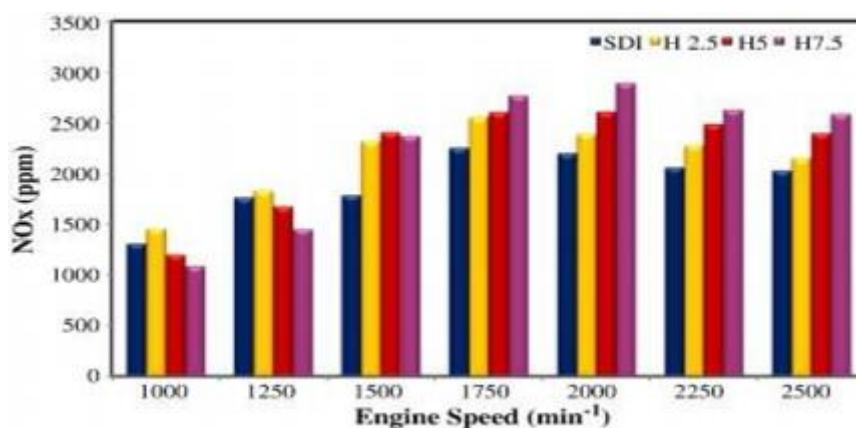
Рисунок 2 – NO_x, NO, NO₂ в зависимости от процентного содержания водорода в расчете на энергию [14, 17]

Köse и Cıvız [18] оценили эффекты двойного топлива водород-дизель на переменных скоростях при полной нагрузке. Процентное содержание водорода по объему, добавляемого в камеру сгорания, составляло 2,5, 5 и 7,5%. Общие результаты эксперимента показали более высокую выходную мощность, выходной крутящий момент, тепловой КПД и уровни NO_x при добавлении водорода, тогда как наблюдались более низкие выбросы УНС, СО и О₂. При добавлении 7,5% водорода наблюдалось увеличение выходной мощности и крутящего момента на 17% при 2250 об/мин и 8,3% при 1250 об/мин соответственно по сравнению с дизельным режимом, как показано на рисунке 3. При низких оборотах двигателя (т.е. 1000 и 1250 об/мин) добавление 5% и 7,5% водорода по объему снижало концентрацию кислорода в камере сгорания по сравнению с дизельным режимом и 2,5% водорода. В результате низкий уровень кислорода привел к плохому окислению, что привело к высоким выбросам СО. Дальнейшие исследования,

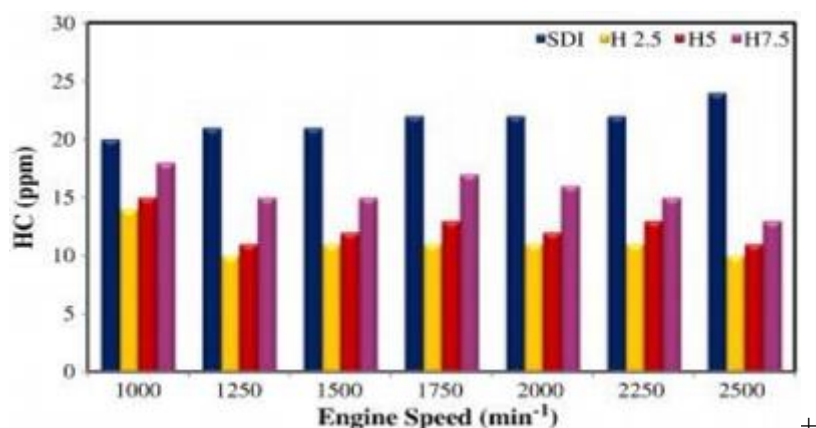
касающиеся двойного водородно-дизельного топлива, представлены в таблице 1.



а) выбросы CO



б) выбросы NOx



в) выбросы сверхвысоких углеводородов

Рисунок 3 – Выбросы выхлопных газов при использовании водородно-дизельного топлива и стандартного дизельного топлива (SDI) [28]

Таблица 1 – Сводная информация о влиянии двойного водородно-дизельного топлива на двигатель с воспламенением

Тип двигателя	Условия испытаний	Производительность	Выбросы
Четырехтактный одноцилиндровый двигатель DI CI	Частота вращения двигателя 1500 об/мин, выходная мощность 3,78 кВт. При разных нагрузках	при добавлении 30% водорода увеличение ВТЕ с 22,78% до 27,9%	С 90% водородом уровень NOx снижен с 2762 до 515 частей на миллион при 70% нагрузке. Снижение выбросов твердых частиц и дыма на 50% при полной нагрузке.
Четырехтактный 4-цилиндровый двигатель DI CI	Частота вращения двигателя 1800 об/мин, при разных нагрузках		Более низкие уровни NOx при низких нагрузках и более высокие уровни NOx при высоких нагрузках. Более низкие уровни УНС с более чем 30% водорода при низких и средних нагрузках. Более низкие уровни PM, CO и CO2 с добавлением водорода.
Четырехтактный одноцилиндровый двигатель DI CI	Частота вращения двигателя 1100 об/мин, при полной нагрузке		Более низкие уровни CO на 67,3 % и 69,2 % при добавлении водорода на 22 и 53 % соответственно. Значительно более высокие уровни NOx при добавлении 53 % водорода. Несколько более высокие уровни УНС при добавлении водорода.
Четырехтактный 6-цилиндровый двигатель DI CI	Четырехтактный 6-цилиндровый двигатель DI CI Холостой ход двигателя В диапазоне нагрузок двигателя	Увеличение ВТЕ и снижение BSFC с увеличением содержания водорода	Более высокие уровни NOx и УНС при высокой нагрузке. Более низкие уровни CO, CO2 при высокой нагрузке
Четырехтактный одноцилиндровый двигатель DI CI	Частота вращения двигателя 1100 об/мин при нагрузке 40 %, 60 %, 75 % и 100 %		Повышенный уровень NOx при полной нагрузке. Более низкий уровень NOx и дыма при низкой нагрузке. Более низкий уровень CO, CO2 при полной нагрузке.

В заключение, некоторые исследования показали, что ВТЕ увеличивается, особенно с увеличением содержания водорода [68, 69, 72]. Использование двойного топлива водород-дизель вместо дизеля приводит к улучшению однородности топливно-воздушной смеси, способствуя лучшему сгоранию [68]. Кроме того, использование водородно-дизельного топлива

может привести к снижению расхода топлива, поскольку диапазон воспламеняемости водорода позволяет двигателю с воспламенением работать в различном диапазоне топливно-воздушных смесей, что приводит к снижению расхода топлива на обедненной смеси [72].

Увеличение содержания водорода приводит к снижению уровня NOx при низких нагрузках и увеличению при высоких нагрузках [70, 72, 73]. Теплотворная способность дизельного топлива ниже, чем у водорода, поэтому увеличение содержания водорода способствует более высокому пиковому давлению и температуре сгорания [64, 72]. В частности, высокая пиковая температура сгорания способствует повышению уровня NOx. При высокой нагрузке достигается увеличение уровня NOx, поскольку более быстрое сгорание усиливается за счет высокой диффузии и скорости пламени.

Уровни дыма или ТЧ снижаются с увеличением содержания водорода из-за улучшения однородности, уменьшения фазы диффузионного горения и углеводородов. Это снижение выбросов дыма или ТЧ может быть связано с уменьшением содержания углерода и увеличением скорости окисления сажи из-за высокой температуры в цилиндре [69, 71].

Большинство исследований показали, что выбросы CO₂ и CO снижались с увеличением концентрации водорода при различных нагрузках [10, 12, 13]. Основная причина такого снижения может быть связана с высоким отношением Н/С из-за добавления водорода [2]. Обогащение водородом также способствует повышению эффективности сгорания и сокращает продолжительность сгорания, что приводит к снижению выбросов CO и CO₂. Кроме того, водород имеет параметр диффузии, который способствует формированию более однородной предварительно смешанной горючей смеси, что увеличивает доступность кислорода [73]. Некоторые исследования показали более низкие уровни УНС при использовании двойного водородно-дизельного топлива [8, 10]. Тем не менее, в нескольких исследованиях было обнаружено, что в результате возникают более высокие

выбросы ВОУ, хотя они по-прежнему соответствуют нормам выбросов [11, 2]. Добавление водорода в камеру сгорания способствует снижению содержания углерода в топливно-воздушной смеси, что приводит к снижению выбросов УНС по сравнению со сгоранием чистого дизельного топлива.

1.5 Применение добавки водорода для интенсификации процесса сгорания бензиновых ДВС

Молекулярный водород может стать альтернативным топливом для двигателей внутреннего сгорания. Его высокая плотность энергии и массы (~ 55 000 БТЕ / фунт), возможность почти нулевых выбросов CO₂ и HC в дополнение к тому факту, что он может использоваться в качестве хранилища возобновляемой энергии (например, производство H₂ путем электролиза воды с использованием солнечной энергии) ставит его на первое место в списке альтернативных методов хранения энергии. Однако у него есть недостатки, такие как объемная плотность энергии, которая на порядок ниже, чем у бензина (~ 76 000 БТЕ / фут³ при 5000 фунтов на квадратный дюйм) [1], что делает хранение газа в некоторой степени проблемой для дальних путешествий. Водород обладает несколькими характеристиками, которые могут быть полезными в этом приложении, включая широкий диапазон воспламеняемости, который обеспечивает сверхбедное соотношение воздух-топливо, быстрое распространение пламени и низкое потребление энергии воспламенения.

Эти характеристики газообразного водорода открывают возможности для улучшения его использования в двигателях внутреннего сгорания. В типичных современных бензиновых двигателях для подачи топлива в двигатель используется распределенный впрыск топлива с компьютерным управлением. Хотя эта схема хорошо работает для жидких углеводородных топлив, у этого метода с использованием водорода в качестве топлива есть

недостатки. Низкая потребность в энергии воспламенения и быстрое распространение пламени водорода увеличивают вероятность обратного воспламенения через впуск двигателя. Впрыск газа через порт также снижает объемный КПД двигателя, вытесняя доступный объем для впуска воздуха. Обе проблемы можно решить, внедрив прямой впрыск водорода в цилиндр, а не через впускной коллектор.

На тему водородных двигателей внутреннего сгорания, HICE, написано множество статей, многие из которых посвящены оптимизации процесса сгорания за счет максимального повышения эффективности двигателя, выходной мощности и минимизации выбросов и нежелательных обратных всплесков. Далее следует небольшой обзор различных журнальных статей, которые помогли нам в исследовании и понимании процесса HICE.

Sierens и Verhelst [2] приняли участие в преобразовании двигателя V8 GM с большим блоком для работы на водороде с использованием многоточечной системы последовательного впрыска. Как указывалось выше, угол опережения зажигания был оптимизирован для максимального увеличения крутящего момента и минимизации выбросов NOx. Момент зажигания, необходимый для достижения среднего наилучшего крутящего момента (МВТ), в основном зависел от соотношения воздух-топливо и диктовался нагрузкой двигателя, которая наблюдалась по изменениям абсолютного давления в коллекторе (MAP). Высокая нагрузка, высокие коэффициенты эквивалентности (Φ) требовали меньшего времени (20° до верхней мертвой точки, ВМТ), в то время как низкая нагрузка, низкое Φ требовали большего (50° до ВМТ). Было отмечено, что из-за высокой скорости пламени водорода интуитивно можно было бы подумать, что диапазон моментов зажигания будет относительно узким, однако из-за широкого диапазона соотношений воздух-топливо ($\Phi = 0,2 - 0,5$) это не так.

Продолжительность и время инъекции также были оптимизированы. Продолжительность широко варьируется в зависимости от диапазона оборотов; при 750 об/мин требуется 3 мс подачи топлива, что соответствует

13,5° угловой продолжительности, а при 3750 об/мин при высокой нагрузке требуется до 14 мс, что соответствует 315° продолжительности проворачивания коленчатого вала. Это физический верхний предел из-за того, что впускной клапан открыт на 317° проворачивания. Было обнаружено, что время впрыска также очень важно и оказывает сильное влияние на эффективность двигателя, особенно на низких оборотах двигателя. Этот параметр отвечал за изменение выходной мощности до 20% и должен начаться позже. на холостом ходу и увеличивается с увеличением оборотов.

Чжоу и др. [3] сообщили о моделировании и экспериментальной проверке предсказания обратного зажигания с использованием 4-цилиндрового двигателя с многоточечным последовательным впрыском. Было отмечено, что из-за низкой требуемой энергии воспламенения водорода вероятность детонации и обратного воспламенения увеличивается в основном из-за горячих точек в камере сгорания, образовавшихся во время предыдущего цикла сгорания. Поэтому их основное внимание уделялось прогнозированию и проверке параметров, влияющих на это явление. Их моделирование показало тенденцию к обратному потоку водорода во впускной коллектор до закрытия впускного клапана, если время впрыска было ранним. Моделирование модели потока, созданное группой, оказалось полезным инструментом для прогнозирования времени окончания впрыска в зависимости от частоты вращения двигателя и Φ , поскольку их прогнозы показали хорошую корреляцию с общими тенденциями экспериментальных данных.

Мохаммади и др. [4] провел очень тщательную оценку одноцилиндрового двигателя HICE с непосредственным впрыском (DI) объемом 858 куб. см, преобразованного из дизельного двигателя с прямым впрыском. Тестирование заключалось в изменении времени впрыска водорода во время такта впуска (300° до ВМТ), раннего и позднего такта сжатия (130° и 100° до ВМТ). Соотношения эквивалентности и момент

зажигания менялись при каждом моменте впрыска, и регистрировались несколько параметров, включая тепловую эффективность тормоза, среднее эффективное давление тормоза и NOx. Было отмечено, что при раннем впрыске (впускной клапан еще открыт) максимальное среднее эффективное давление в цилиндре уменьшилось по сравнению с исходным дизелем, хотя, что интересно, оно увеличилось при более позднем впрыске (герметичный цилиндр) и превысило давление исходной дизельной конфигурации. Термическая эффективность тормозов следовала той же тенденции и превысила 38,9%. Было также показано, что наибольшим фактором, способствующим образованию NOx, были более богатые топливовоздушные смеси, для которых $\Phi = 0,5$ оказался верхним пределом приемлемого образования NOx. Группа пришла к выводу, что поздний впрыск во время такта сжатия (после закрытия впускного клапана) повышает термический КПД и максимальную выходную мощность при одновременном снижении образования NOx за счет работы на обедненной смеси.

Чой и др. [5] обсуждают причину коэффициента вариации цикла сгорания (COV) в HICE и его влияние на производительность и стабильную работу двигателя. Они отмечают, что изменение горения вызывает изменение среднего эффективного давления, наблюдаемого в цилиндре. Возможными причинами этого изменения являются различия в расходе топлива и воздуха в момент воспламенения, неоднородность смеси, а также смесь свежего воздуха и остаточных газов вблизи источника воспламенения. Это делит теории на две группы; что общее изменение вызвано изменением раннего сгорания и/или что оно вызвано периодом быстрого сгорания. Группа использует одноцилиндровый двигатель объемом 433 куб. см с непосредственным впрыском, происходящим в начале такта сжатия. Они проверили влияние частоты вращения двигателя, момента впрыска, соотношения воздух-топливо и момента зажигания на коэффициент вариации цикла. Сгорание было стабильным во всем испытанном диапазоне оборотов (1200-1800 об/мин), хотя COV постепенно увеличивается. Время

впрыска оптимально совпадает с закрытием впускного клапана, и COV быстро увеличивается, когда угол поворота коленчатого вала приближается к верхней мертвой точке, ВМТ. Работа двигателя была стабильной в широком диапазоне соотношения воздух-топливо AFR ($0,6 < \Phi < 1,4$).

1.6 Способы исследования процесса сгорания в двигателях с искровым зажиганием

Спектроскопия искрового пробоя, а также спектроскопия лазерного пробоя (LIBS) представляют собой методы атомно-молекулярной эмиссионной спектроскопии, в которых в качестве источника возбуждения используется искровая или лазерная плазма. В реактивных смесях воспламеняющая плазма может использоваться для поджига смеси при превышении порога минимальной энергии воспламенения, а также в качестве средства диагностики процесса воспламенения. Визуализация фильтрованной плазмы — это метод визуализации плазменного канала и его обнаружения из-за потока вокруг свечи зажигания. С другой стороны, велосиметрия изображения частиц обычно является методом выбора для визуализации поля. Теневая графика и шпирен-визуализация — это методы визуализации градиентов плотности, которые появляются, например, в облаках или в недорасширенных струях. Оба метода являются методами прямой видимости, так же как и хемилюминесценция, где можно измерить излучение света в результате некоторой химической реакции. При использовании промежуточных продуктов горения, таких как радикалы OH^* и CH^* , хемилюминесценция может быть использована для отслеживания фронта аме. Когда важна пространственная информация, предпочтительным методом является индуцированная лазером флуоресценция.

1.6.1 Спектральные исследования смесового метано-водородного топлива

Эффект добавления водорода к метану был исследован путем измерения спектральной эмиссии смесей с объемным процентным содержанием водорода в диапазоне от 0 до 100%. Испытания проводились при 2 бар, с выдержкой 300 мкс, усредненные по ансамблю результаты представлены на рисунке 4. Время воздействия достаточно велико, чтобы в спектрах отчетливо проявлялись полосы пропускания C_2 в диапазоне 468–567 нм. С увеличением содержания водорода интенсивность этих пиков неуклонно снижается, а бальмеровская линия водорода возрастает. При использовании 100% водорода линия Бальмера также становится достаточно заметной, чтобы ее можно было четко распознать при 486 нм.

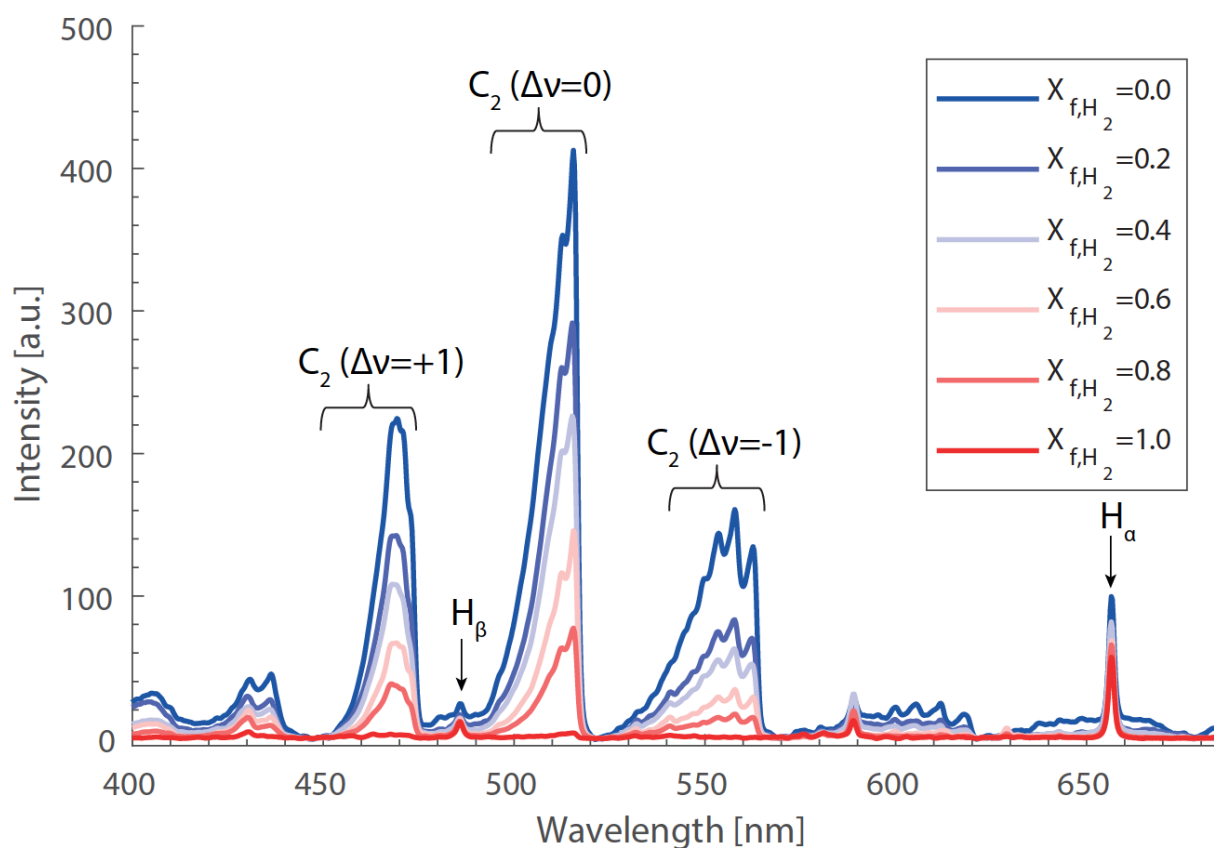


Рисунок 4 – Спектральные выбросы для объемных долей водорода в топливе в пределах 0,0-1,0. Давление при зажигании 2 бар, время экспозиции камеры $t_{exp} = 300$ мкс, $t_d = 0$ мкс.

Для количественной оценки изменения интенсивности пиков при добавлении водорода рассматривали пики бальмерлинской (H) и пики полос

Свана при 515 ($C_{2,515}$) и 565 нм ($C_{2,565}$). Соответствующие отношения интенсивностей представлены на рисунке 5 в зависимости от массовой доли водорода на оси абсцисс. Кроме того, объемная доля отложена на второй оси ординат. Рассматривая $H/C_{2,515}$, можно заметить, что отношение изменяется линейно вплоть до массовой доли водорода примерно 33%, что соответствует 80 об.%. При дальнейшем увеличении отношение интенсивностей становится более крутым, изменяясь от 0,85 для 80 об.% водорода до 14,6 для 100 % водорода. Аналогичное поведение достигается при $H/C_{2,565}$, при этом отношение интенсивностей увеличивается примерно с 0,65 для чистого метана до 47,9 для чистого водорода.

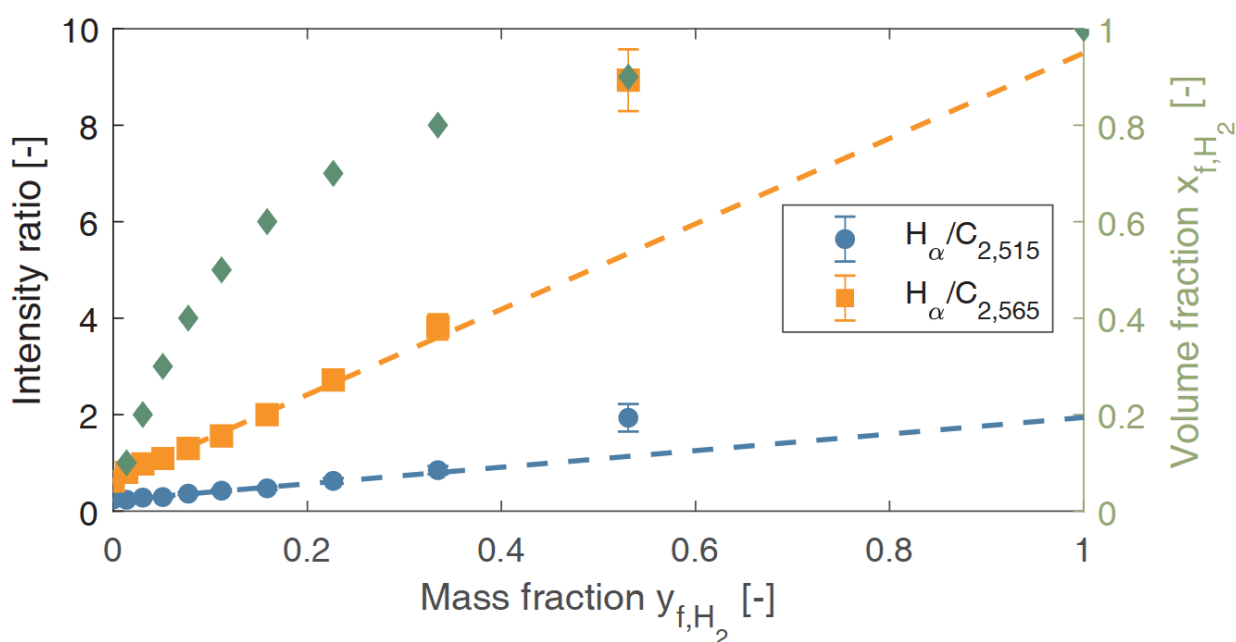


Рисунок 5 – Отношения интенсивности излучения для линии Бальмера и двух линий полосы Сванда при 515 нм (кружки) и 565 нм (квадраты) в зависимости от массовой доли водорода в метане. Кроме того, соответствующая объемная доля водорода отложена на второй оси ординат (ромбики).

1.6.2 Визуализация фронта пламени

Шлирен-визуализация является предпочтительным методом для определения скорости горения дыма в бомбах постоянного объема для сферически расширяющихся дымов. Ламинарные скорости для водорода [40,

41, 43, 44, 56], метана [46, 47, 48, 49, 50], обогащенного водородом метана [43, 50, 53, 54, 55] и многие другие виды топлива были измерены на основе временной эволюции радиусов пламени, определенных по шлирен-изображениям. Пишингер и Хейвуд [13, 28] применили шлирен-визуализацию в прозрачном прямоугольном поршневом двигателе с двухракурсной шлирен-установкой и зеркалом на головке цилиндра для изучения раннего формирования ядра пламени и влияния геометрии электродов на тепловые потери. Бэйн и др. [115] использовали высокоскоростную шлирен-визуализацию для изучения волны давления, генерируемой пробоем для электродов различной геометрии в водородно-воздушных смесях. Другие методы визуализации фронта пламени включают хемилюминесценцию OH^* и CH^* (прямая видимость) или лазерно-индуцированную флуоресценцию для визуализации плоского фронта пламени. Скалла использовал оба метода для визуализации концентрации топлива во впускном канале, а также в камере сгорания оптического одноцилиндрового двигателя [33].

Выводы первой главе изучение литературы.

Обзор научных работ показал, что водород это очень дорогой вид топлива, так что основной проблемой его активного применения в автомобильных двигателях является разработка способов дешевого производства водорода в объемах необходимым для того чтобы можно было рассматривать его как альтернативу базовым топливам. Что приводит к выводу о целесообразности исследовать возможности водорода, как активатора горения основного топлива, причем доля водорода по массе топлива не должна превышать 1-3%.

Показана возможность добавления водорода для уменьшения циклических колебаний процесса горения.

Глава 2 Описание экспериментального оборудования

Экспериментальные исследования проводились в специально оборудованном боксе на кафедре «Энергетические машины и системы управления» ТГУ. Основные исследования проводились на двигателе ВАЗ-2111 (рисунок 6) и исследовательской установке УИТ-85 (рисунок 7).

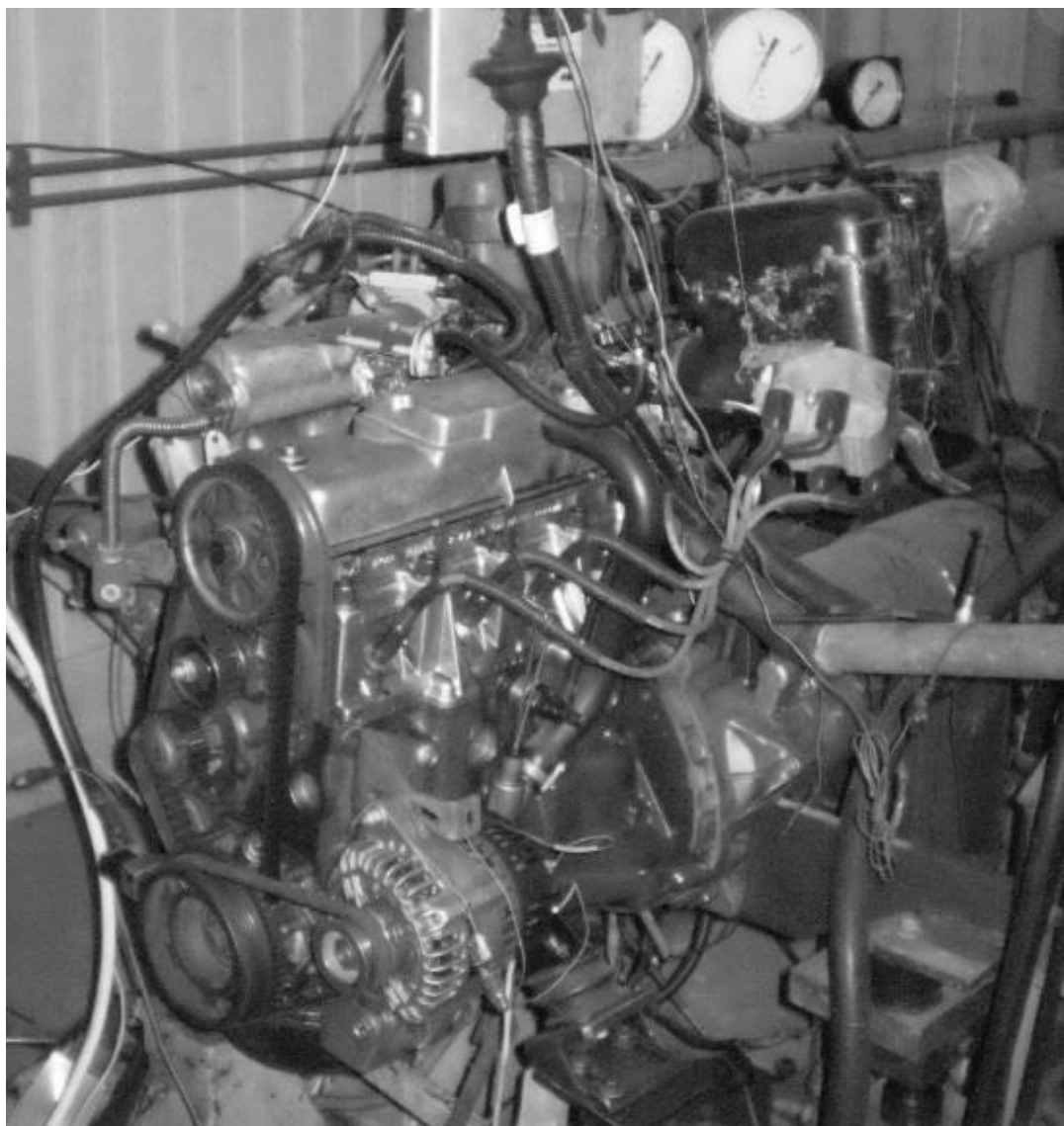


Рисунок 6 – Внешний вид исследовательской установки на базе двигателя ВАЗ-2111

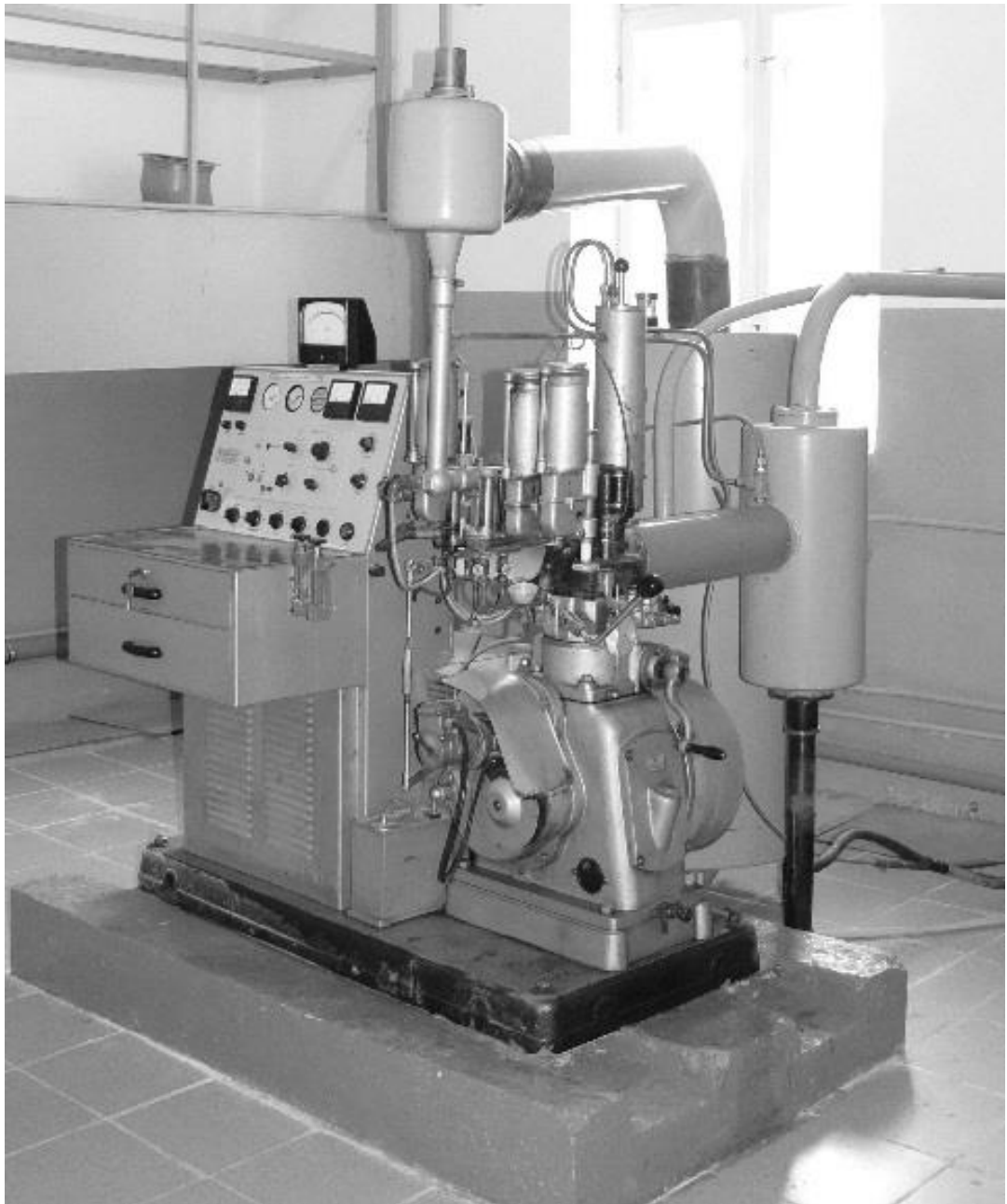


Рисунок 7 – Внешний вид исследовательской одноцилиндровой установки УИТ-85

Для исследования процесса сгорания по ионизационным датчикам, была предложена и создана специальная пластина с установленными в неё датчиками ионизации (рисунок 8). Основные характеристики двигателей, на которых проводились исследования приведены в таблице 2.

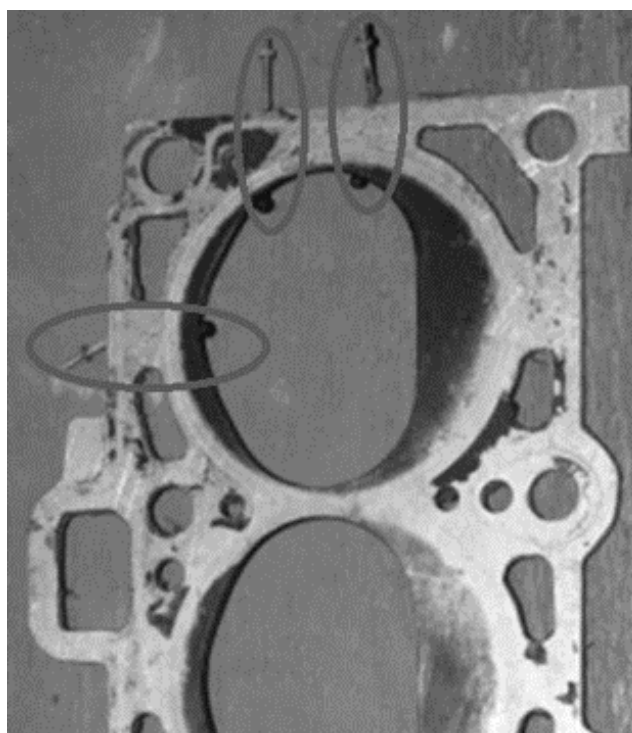


Рисунок 8 – Исследовательская пластина с датчиками ионизации для двигателя ВАЗ-2111

Таблица 2 – Основные характеристики двигателей, на которых проводились исследования

Тип	УИТ-85	ВАЗ-2111	ВАЗ-2111 с пластиной
Число цилиндров	1	4	4
Рабочий объем, л	0,652	1,499	1,499
Степень сжатия	7	9,8	7,5
Диаметр цилиндра, мм	85	82	82
Ход поршня, мм	115	71	71
Длина шатуна, мм	266	121	121
Частота вращения, мин ⁻¹	900	880	880

Для исследования процесса сгорания сжатого природного газа с добавками водорода применялось следующее исследовательское оборудование. Во-первых, это датчик давления, установленный в переходник со свечой зажигания в двигателе ВАЗ-2111 или в место установки магнитострикционного датчика для исследовательской установки УИТ-85 (рисунок 9). Также активно применялись датчики ионизации варианты которых представлены на рисунке 10.

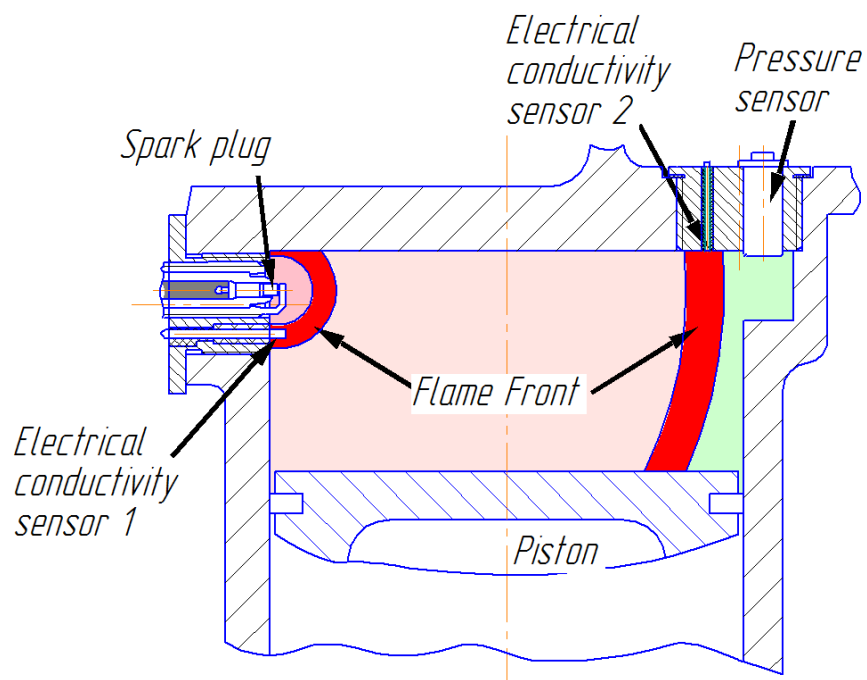


Рисунок 9 – Исследовательская схема применяемая в УИТ-85

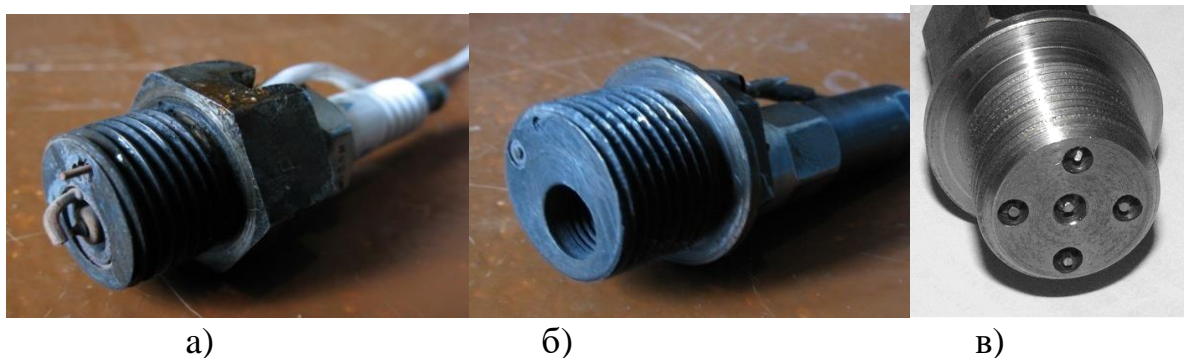


Рисунок 10 – Датчики ионизации для исследования электропроводности пламени в УИТ-85: а) у свечи зажигания; б) в переходнике с датчиком давления; в) пять электродов в переходнике вместо датчика магнитострикции.

Выводы по главе 2

Проведенный анализ показал, что для объективного исследования процесса сгорания необходимо применять как интегральные методы исследования, например датчик давления, так и локальные позволяющие оценить влияние состава топливно-воздушно смеси на кинетику химических реакций горения.

Глава 3 Обзор результатов экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа с добавкой водорода в двигателе ВАЗ-2111 при подаче топлива во впускной трубопровод

Экспериментальные исследования проводились с 2011 по 2015 года под руководством доцента Смоленского В.В. Результаты экспериментальных исследований представлены для двигателя ВАЗ-2111 и для двигателя ВАЗ-2111 с исследовательской платиной с датчиками ионизации, представлены в виде графиков.

На рисунке 11 представлены характеристики расхода топлива и воздуха в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

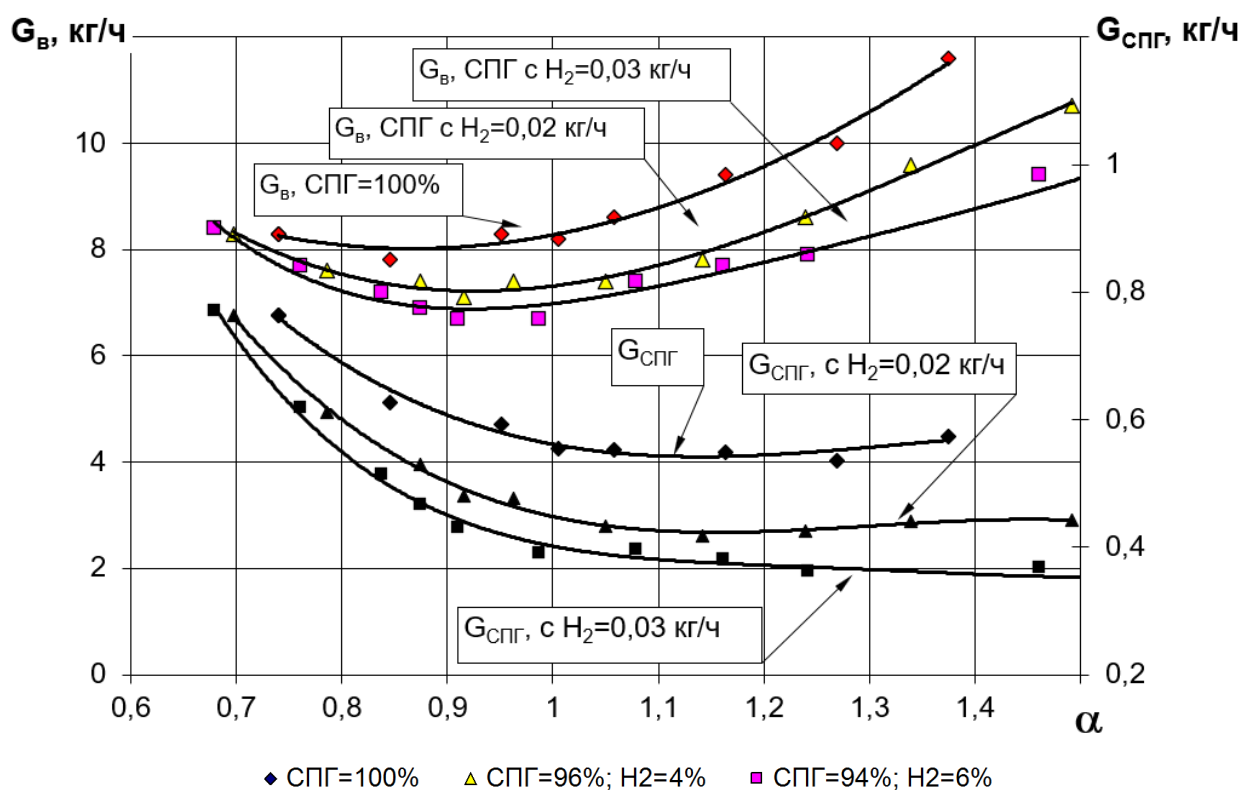


Рисунок 11 – Характеристики расхода топлива (природный газ и природный газ с водородом) и воздуха в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Из рисунка 11 видно, что водород сокращает расход природного газа при всех составах ТВС. Это связано в первую очередь с тем, что водород имеет почти в три раза большую теплотворную способность чем природный

газ, по этой причине проведем анализ влияния водорода на теплотворную способность топливной смеси, приведенную на рисунке 12.

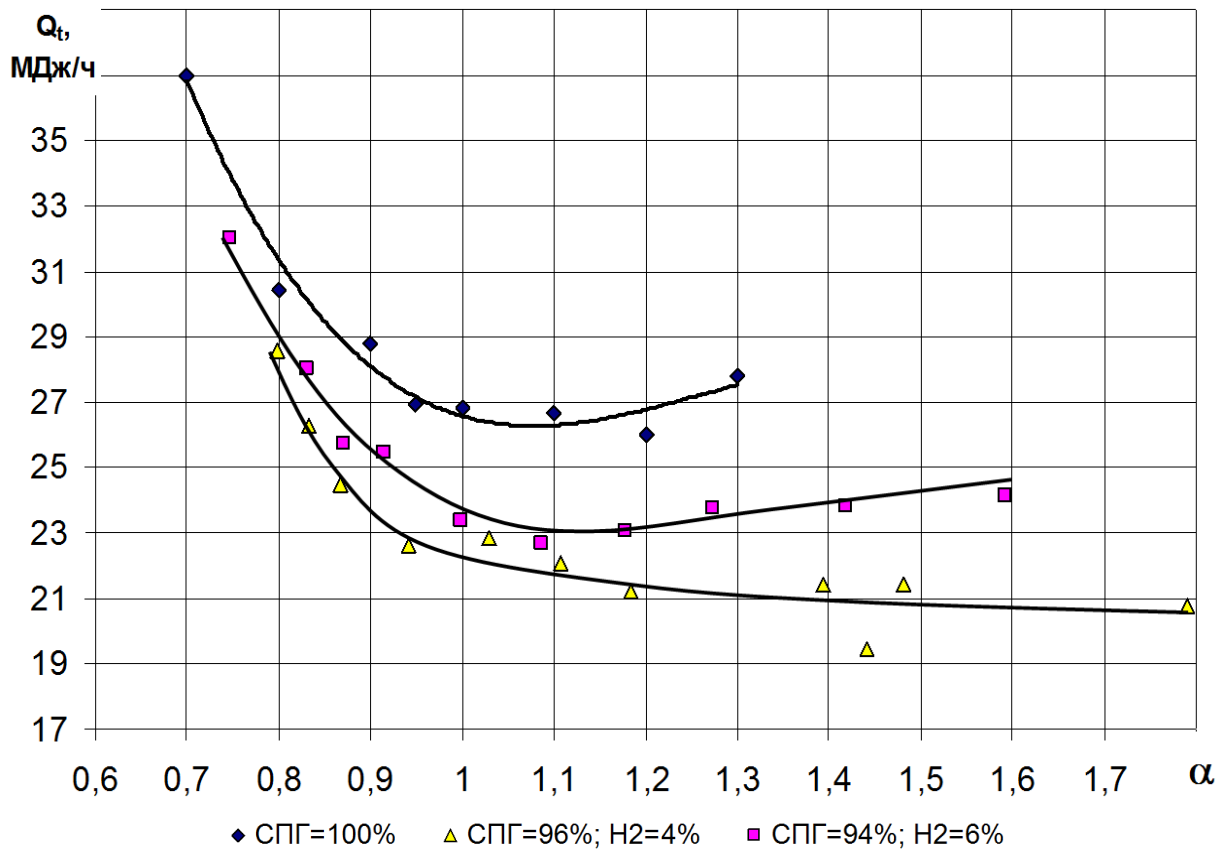


Рисунок 12 – Влияния водорода на теплотворную способность топливной смеси в зависимости от коэффициента избытка воздуха для двигателя ВАЗ-2111 на режиме ХХ, при $n = 880 \text{ мин}^{-1}$, УОЗ - опт

Помимо увеличения теплотворной способности водород при добавке в природный газ повышает скорость тепловыделения, которая напрямую влияет на индикаторные показатели работы двигателя. Поэтому приведем анализ влияния добавки водорода в природный газ на максимальное давление в цилиндре двигателя ВАЗ-2111 на режиме холостого хода (рисунок 13).

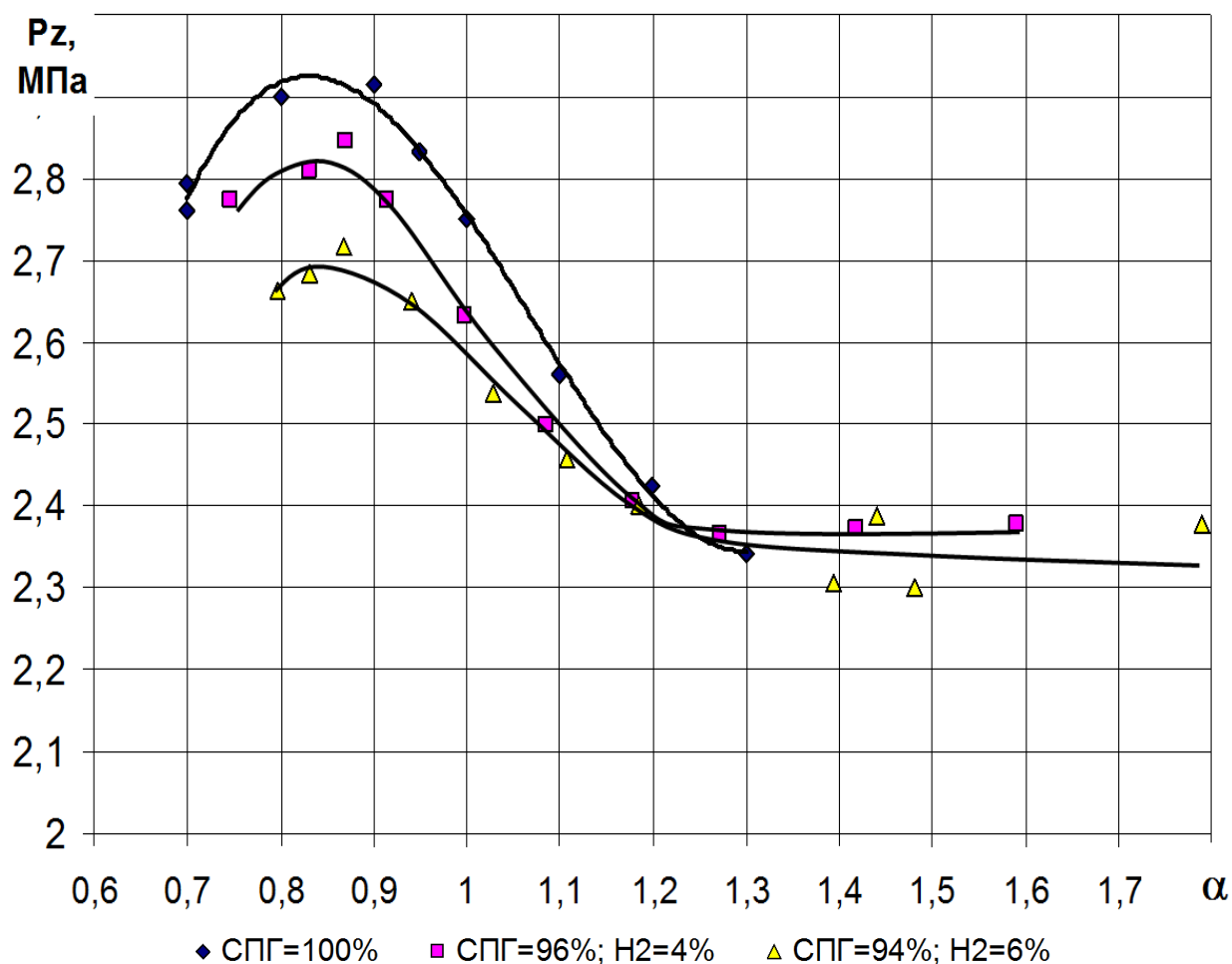


Рисунок 13 – Влияния добавки водорода в природный газ на максимальное давление в цилиндре двигателя ВАЗ-2111 на режиме холостого хода

На максимальное давление в цикле помимо скорости тепловыделения, также оказывает влияние угол опережения зажигания и разбавленность остаточными газами которую можно оценить по величине перепада давления во впускном трубопроводе, что приведено на рисунке 14. Из рисунка 14 видим, что водород увеличивает перепад давления связанной с большим прикрытием дроссельной заслонки, а также уменьшает оптимальный угол опережения зажигания, что возможно за счет сокращения времени сгорания из-за повышения скорости распространения пламени при добавке водорода в сжатый природный газ.

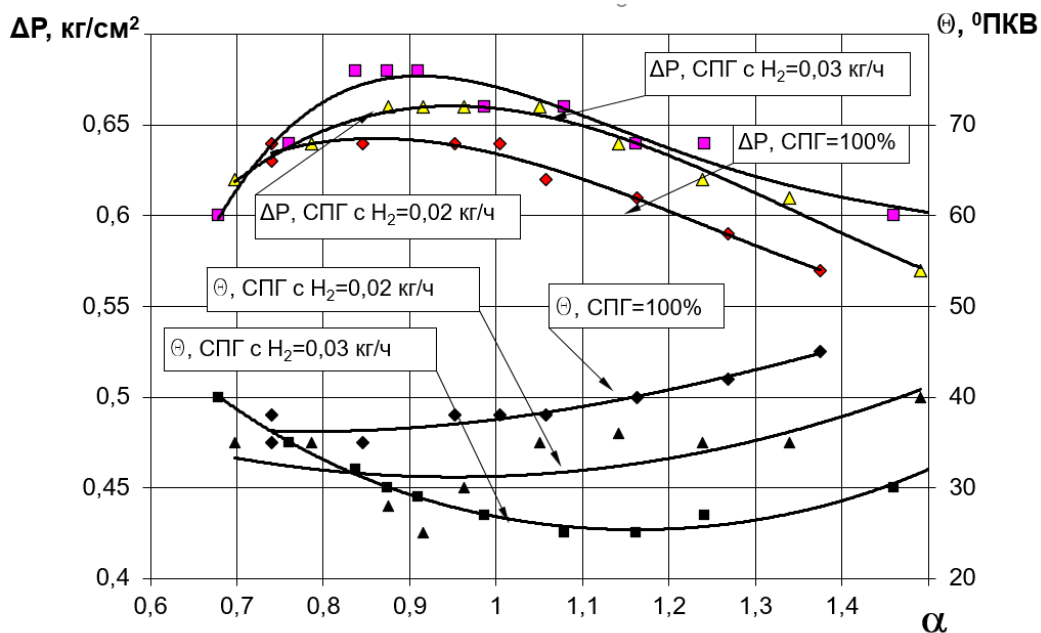


Рисунок 14 – Влияние водорода на оптимальный угол опережения зажигания и величину перепада давления во впускном трубопроводе для двигателя ВАЗ-2111 на режиме холостого хода

Исследование влияние добавки водорода на протекание процесса сгорания во фронте пламени проводились на двигателе ВАЗ-2111 со степенью сжатия 7,5 из-за установки исследовательской пластины. Характеристики расхода топлива приведены на рисунке 15.

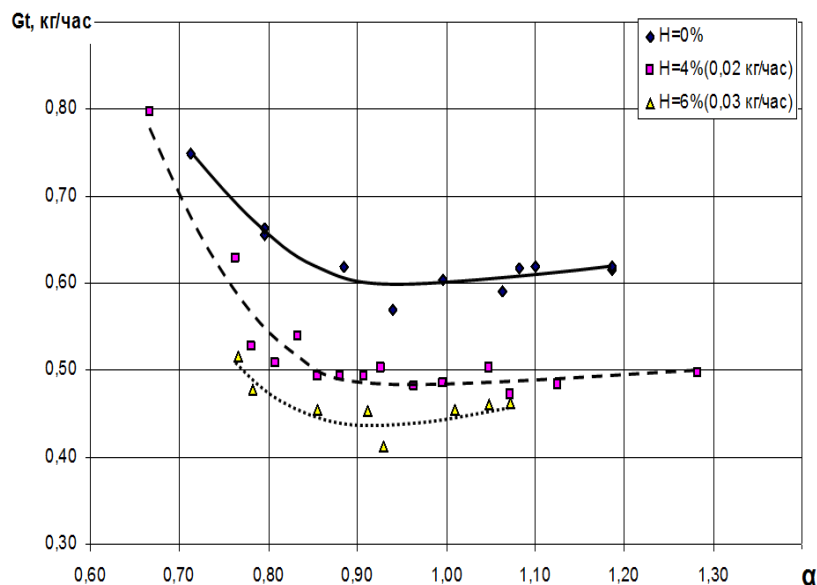


Рисунок 15 – Характеристики расхода топлива (природный газ и природный газ с водородом) и воздуха в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Оценим влияние водорода на характеристику ионного тока в пламени (рисунок 16), как зависимость от состава смеси, для двигателя на холостом ходу со степенью сжатия 7,5.

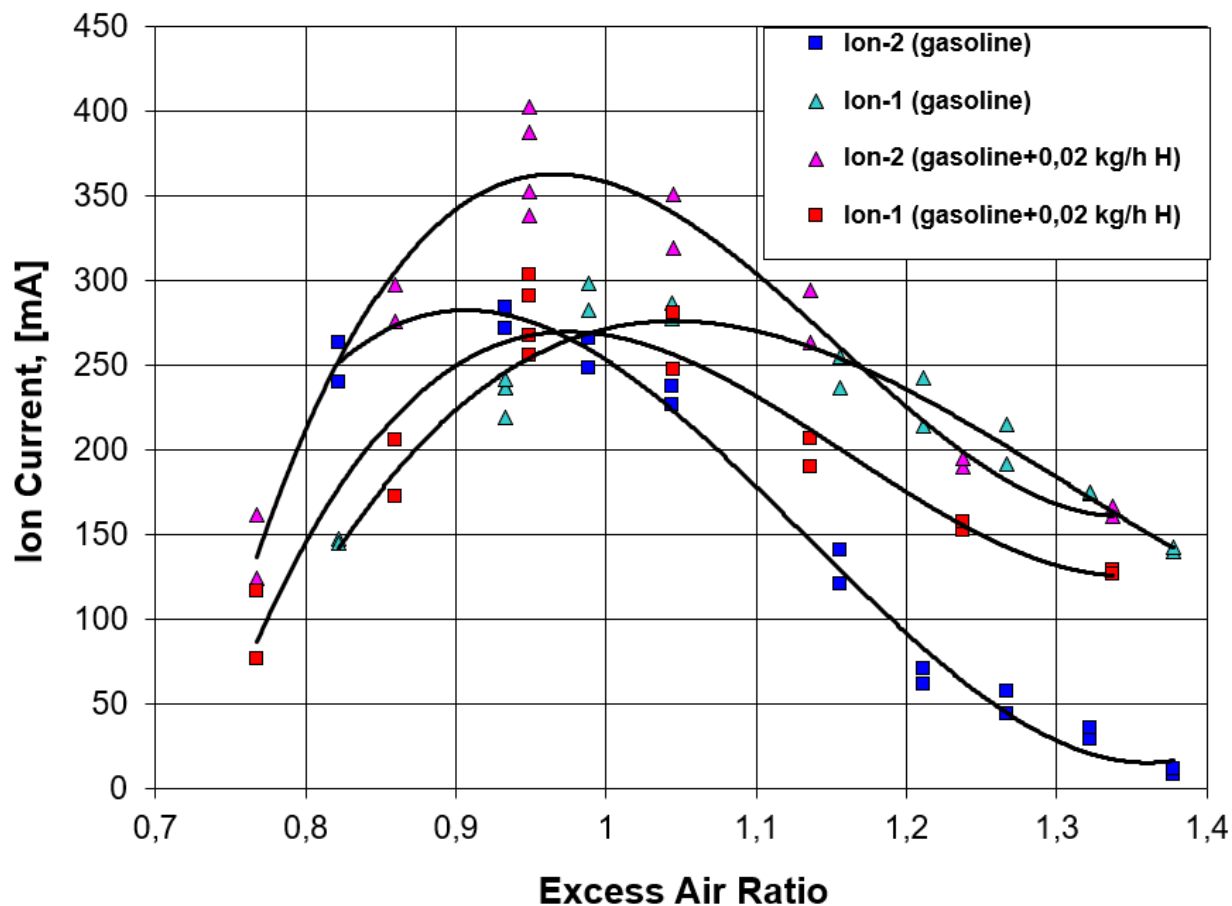


Рисунок 16 – Характеристики ионного тока в пламени при добавке водорода в топливо, как зависимость от состава смеси, для двигателя на холостом ходу со степенью сжатия 7,5

За счет применения датчиков ионизации удалось оценить средние скорости распространения фронта пламени в процессе сгорания в двигателе ВАЗ при степени сжатия 7,5 на режиме холостого хода. Скорости распространения фронта пламени оценивались, как расстояние пройденное пламенем по кратчайшему пути от свечи зажигания до датчика установленного в 15 мм под свечой зажигания (это скорость V_1) и путь от свечи зажигания до датчика установленного в 45 мм у выпускного клапана (это скорость V_2), полученная характеристика представлена на рисунке 17.

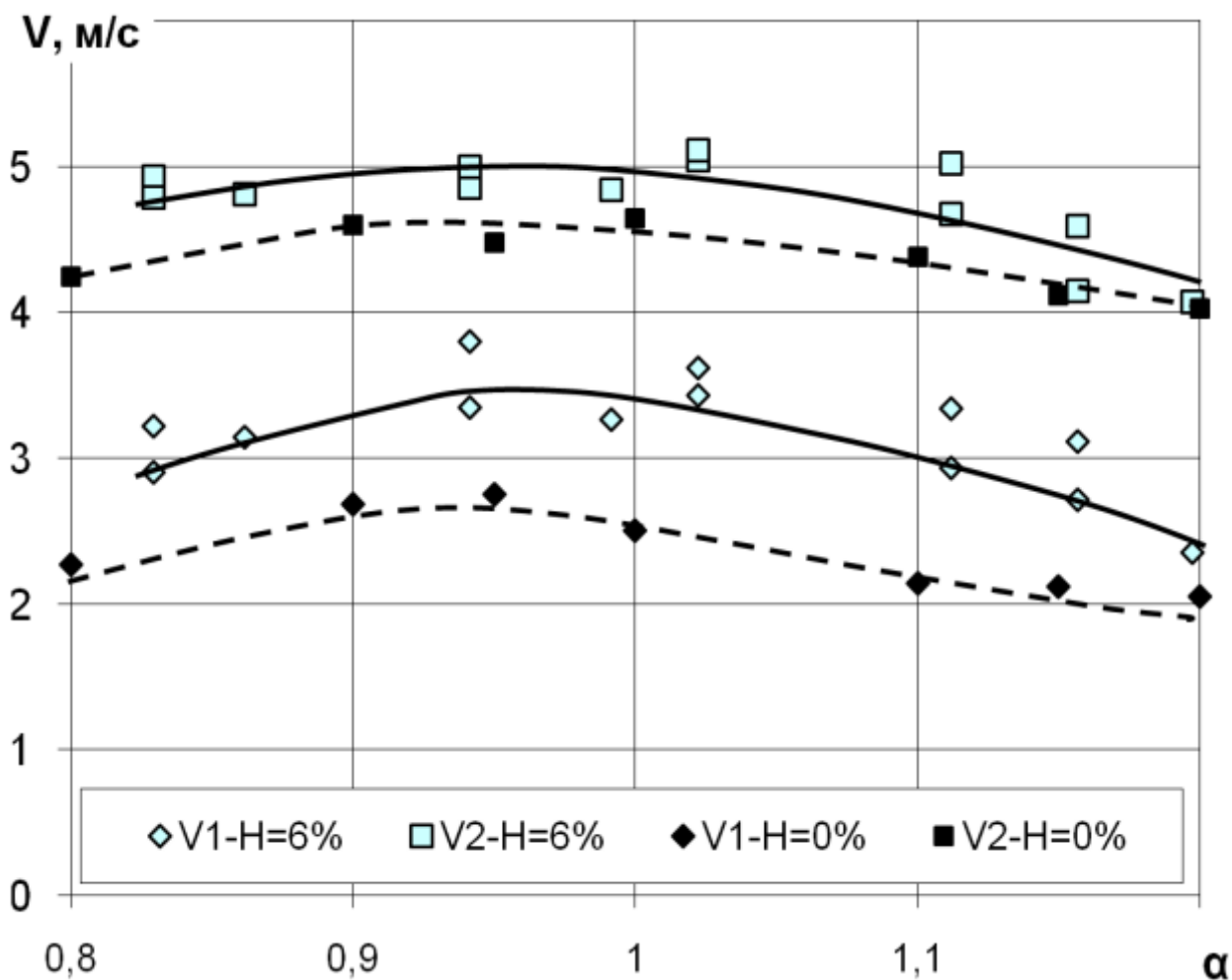


Рисунок 17 – Средние скорости распространения фронта пламени в процессе сгорания в двигателе ВАЗ

Характеристики сгорания водорода с природным газом по максимальному давлению хорошо коррелируются с характеристиками интенсивности сгорания во фронте пламени, а именно с величиной ионного тока проводимости пламени, как это показано на рисунке 18.

Из рисунка 18 видим, что для одного химического состава топлива имеется прямая зависимости максимального давления в цилиндре двигателя от скорости химических реакций горения во фронте пламени оцениваемых по величине амплитуды ионного тока проводимости пламени.

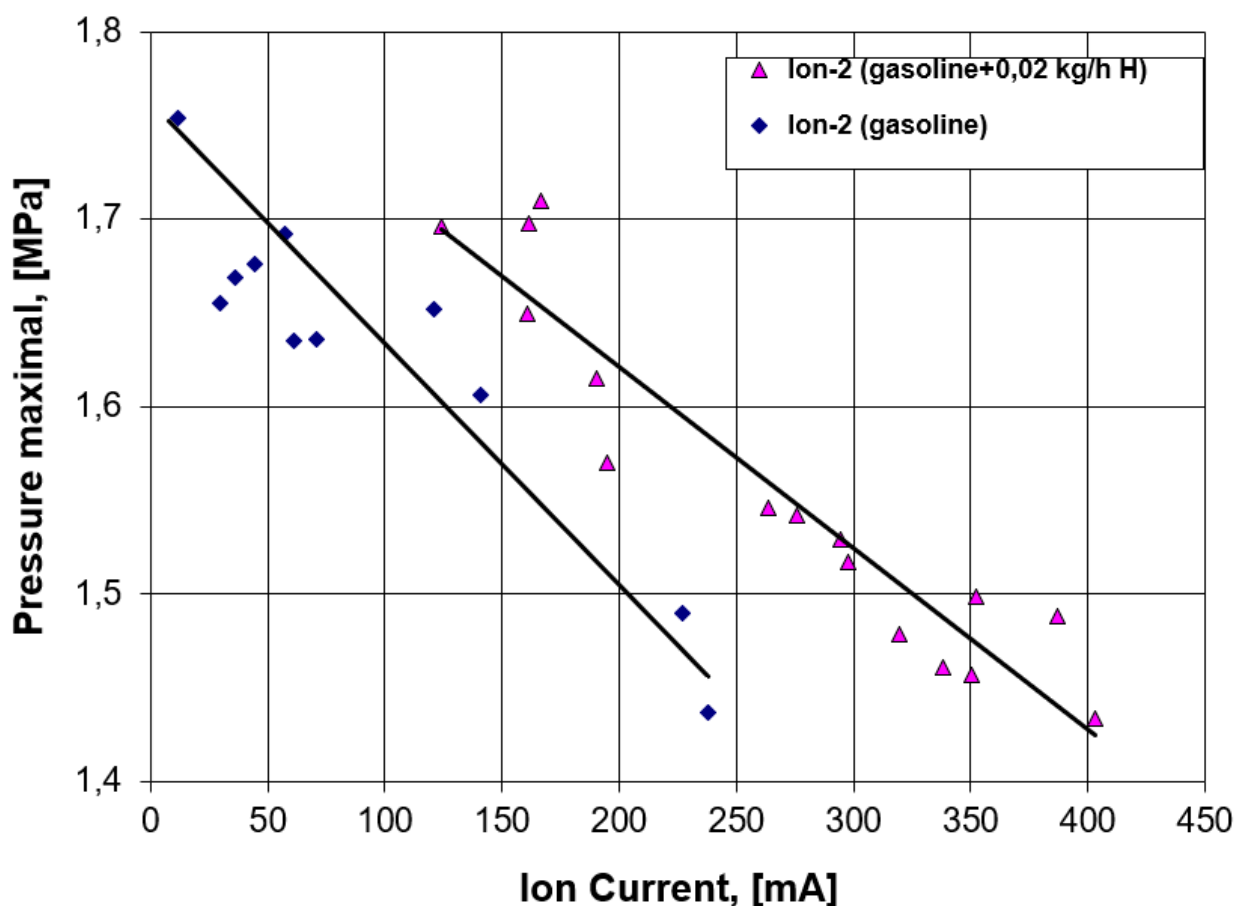


Рисунок 18 – Корреляция максимального давления с величиной ионного тока проводимости пламени при добавке водорода в топливо

Выводы по главе 3

Анализ экспериментальных данных полученных на двигателе ВАЗ-2111 на режиме холостого хода, показал значительное влияние водорода на процесс сгорания природного газа. Так получено, что добавка водорода:

- Увеличивает скорость тепловыделения.
- Повышает равномерность рабочего процесса путем уменьшения межциклового не идентичности.
- Снижает расход топлива причем, также снижается потребность в количестве подведенной энергии.
- Выявлены корреляционные зависимости параметров сгораний с величиной ионного тока проводимости.

Глава 4 Обзор результатов экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа с добавкой водорода в исследовательской установке УИТ-85 при подаче топлива во впускной трубопровод

4.1 Анализ характеристик электропроводности

Изменение основных термодинамических параметров цикла, характеризующих скорость тепловыделения и электропроводность пламени для УИТ-85 приведены для примера для состава смеси CNG = 85%, H₂ = 15% (рисунок 19).

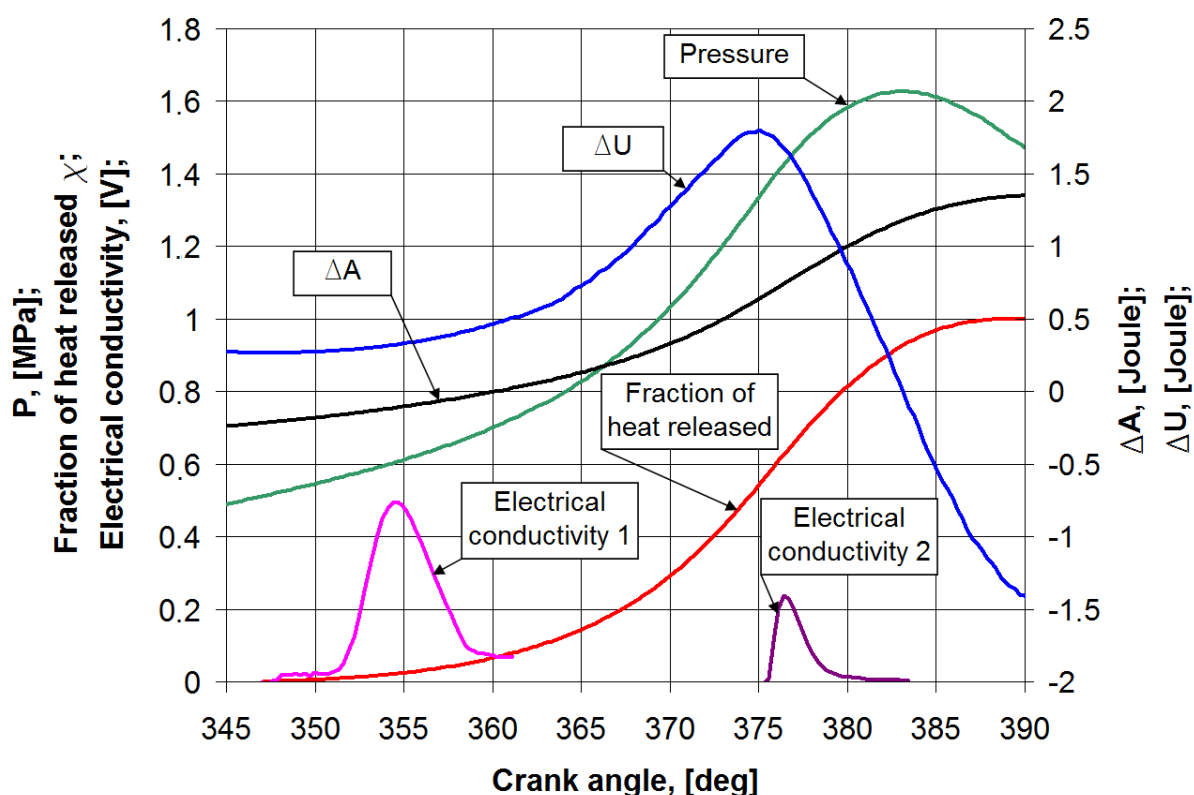
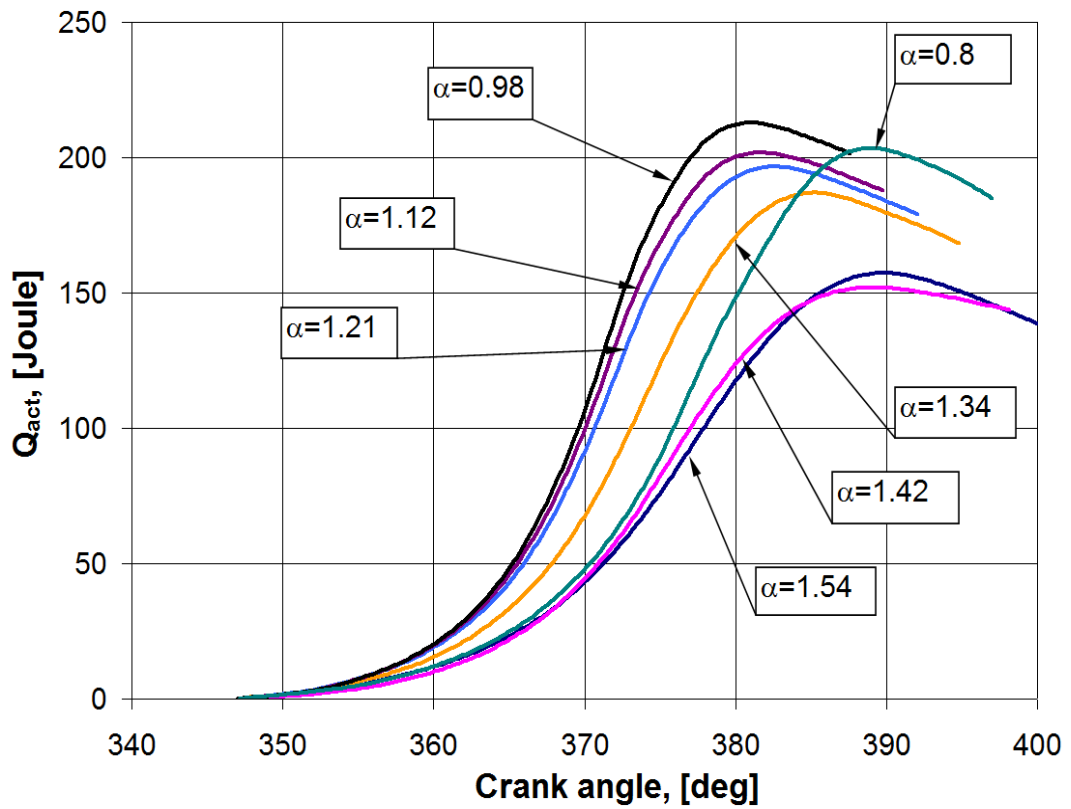
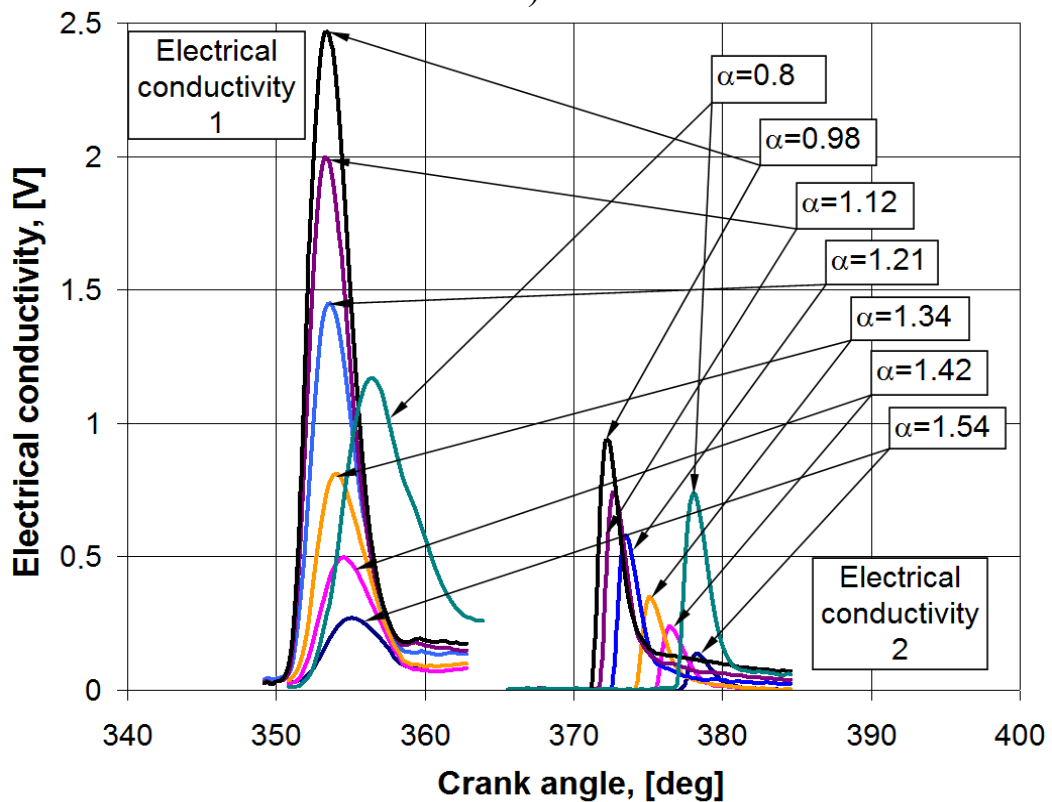


Рисунок 19 – Связь скорости тепловыделения и электропроводности пламени для УИТ-85 при работе на CNG = 85%, H₂ = 15%

Термодинамический анализ показал наличие корреляционных зависимостей между количеством активно выделившегося тепла в процессе сгорания и характеристиками электропроводности пламени (рисунок 20).



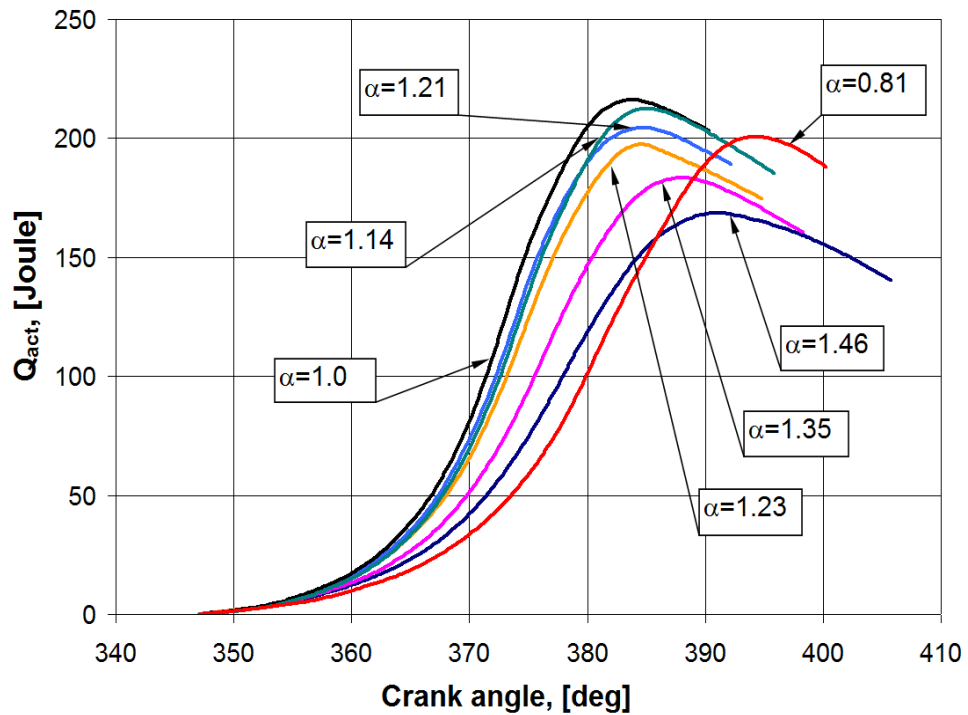
a)



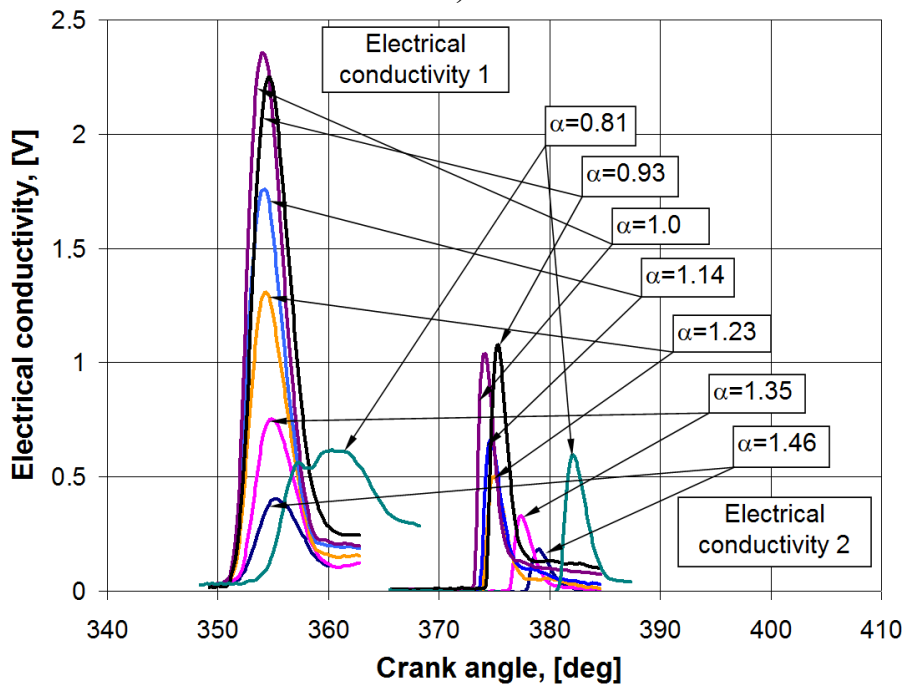
б)

Рисунок 20 – Влияние коэффициента избытка воздуха при составе смеси CNG = 85%, H₂ = 15% на: (а) количество активно выделившегося тепла в процессе сгорания и (б) характеристики электропроводности пламени

Из них мы видим, что увеличение доли водорода повышает скорость тепловыделения, а, следовательно, и эффективность подвода теплоты. А соответствующие этим режимам характеристики электропроводности приведены на рисунках 21, 22, 23 и 24.

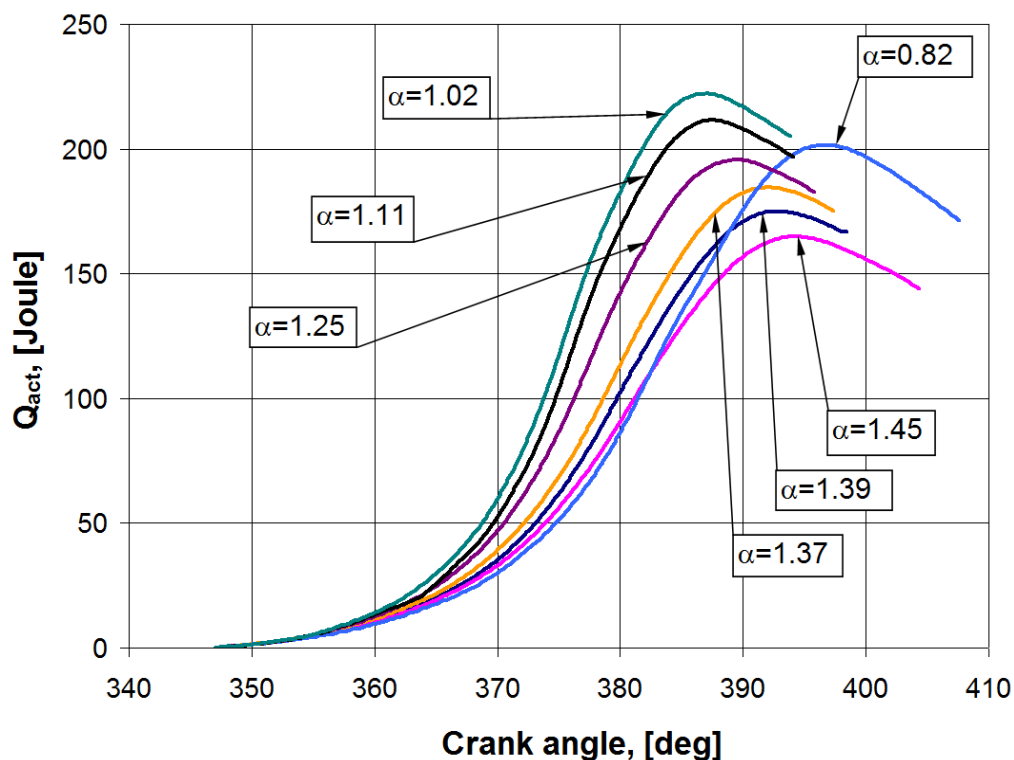


а)

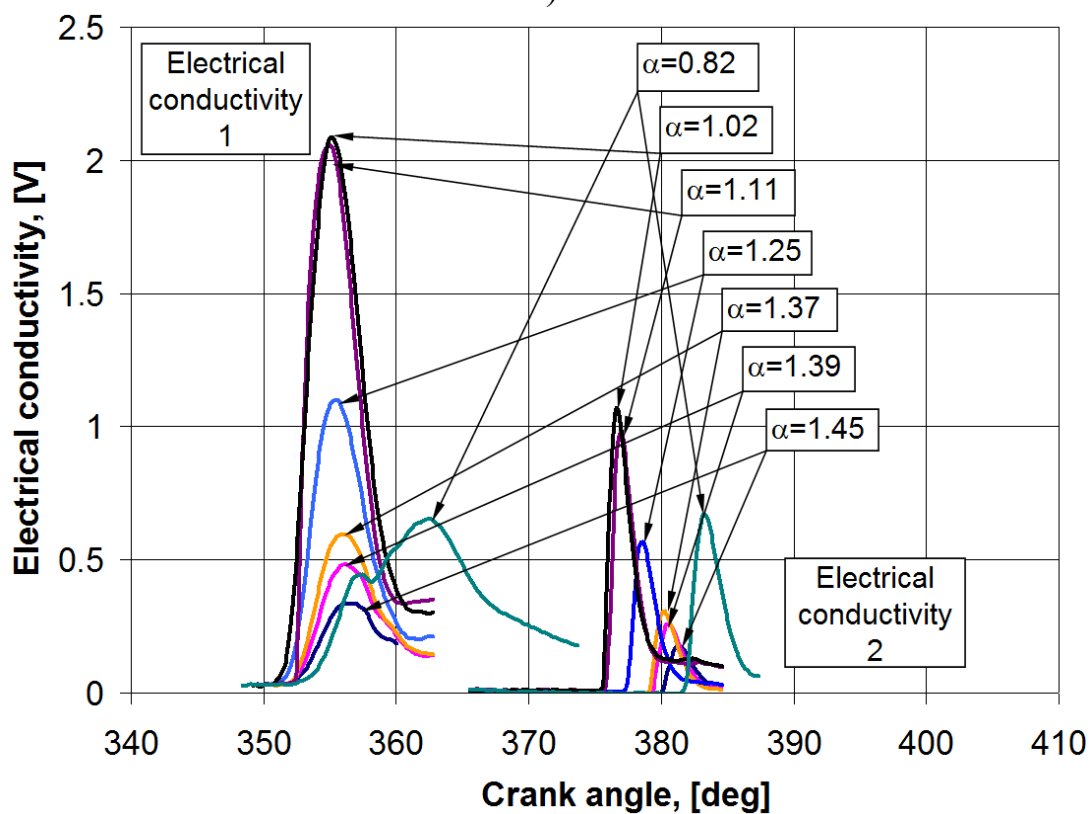


б)

Рисунок 21 – Влияние коэффициента избытка воздуха при составе смеси CNG = 90%, H₂ = 10% на: (а) количество активно выделившегося тепла в процессе сгорания и (б) характеристики электропроводности пламени

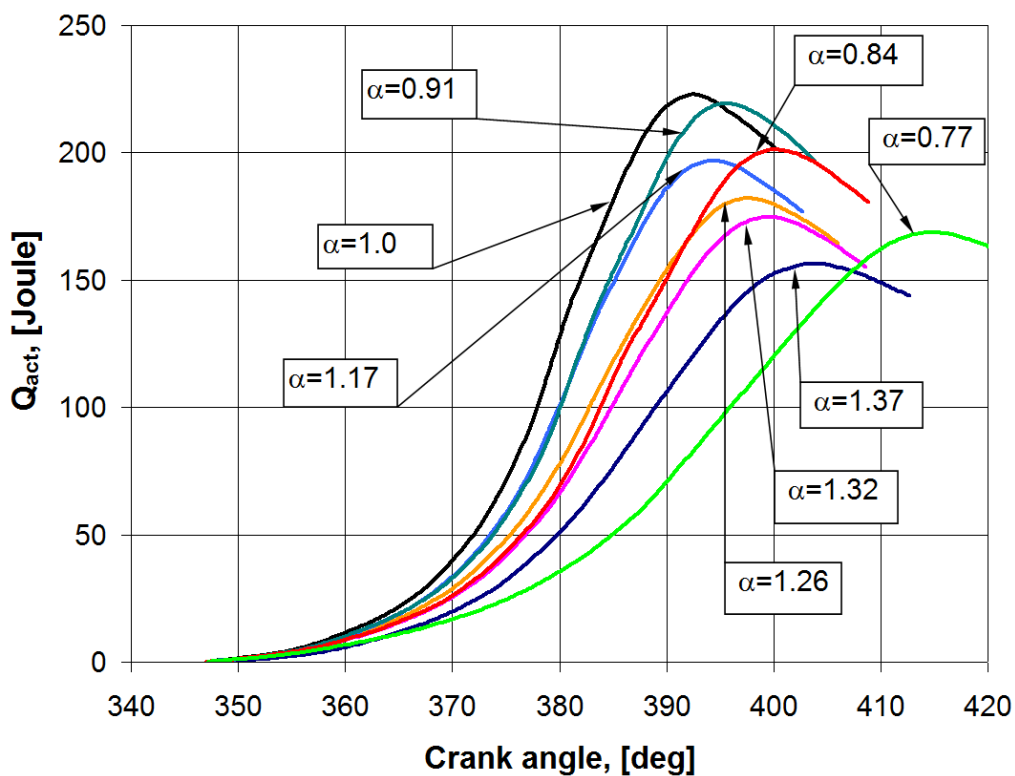


a)

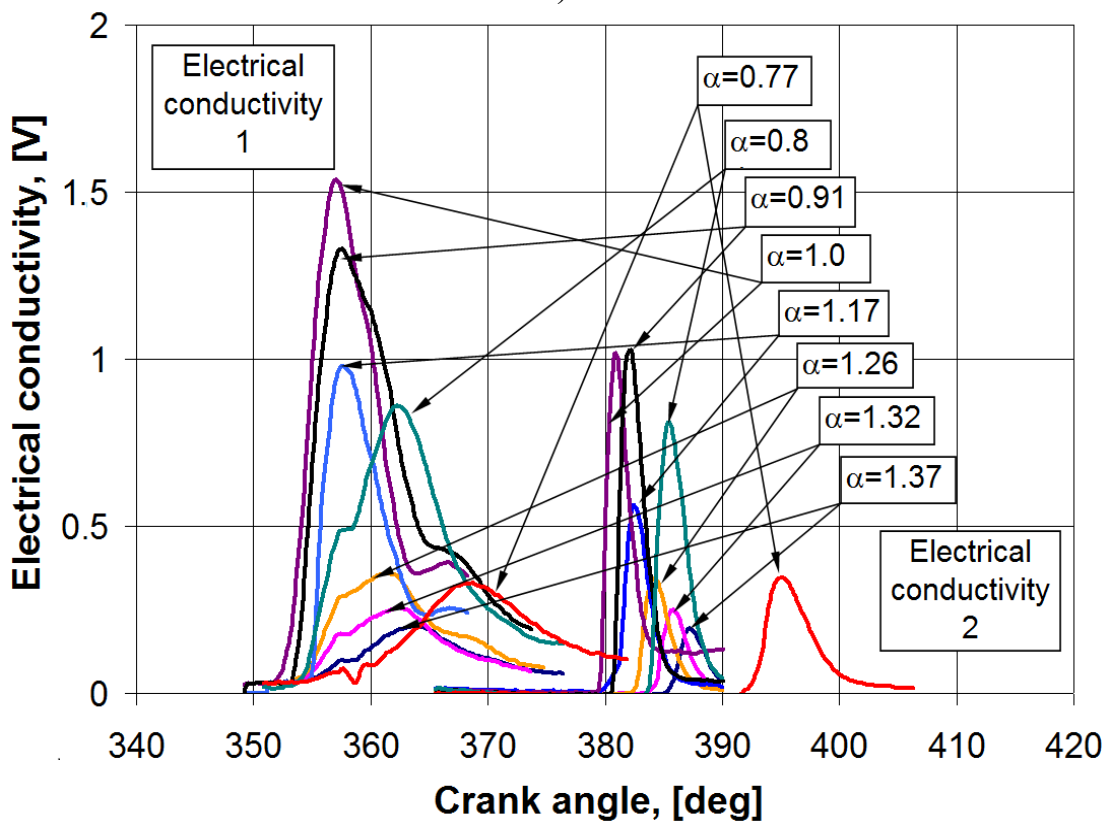


б)

Рисунок 22 – Влияние коэффициента избытка воздуха при составе смеси CNG = 95%, H₂ = 5% на: (а) количество активно выделившегося тепла в процессе сгорания и (б) характеристики электропроводности пламени

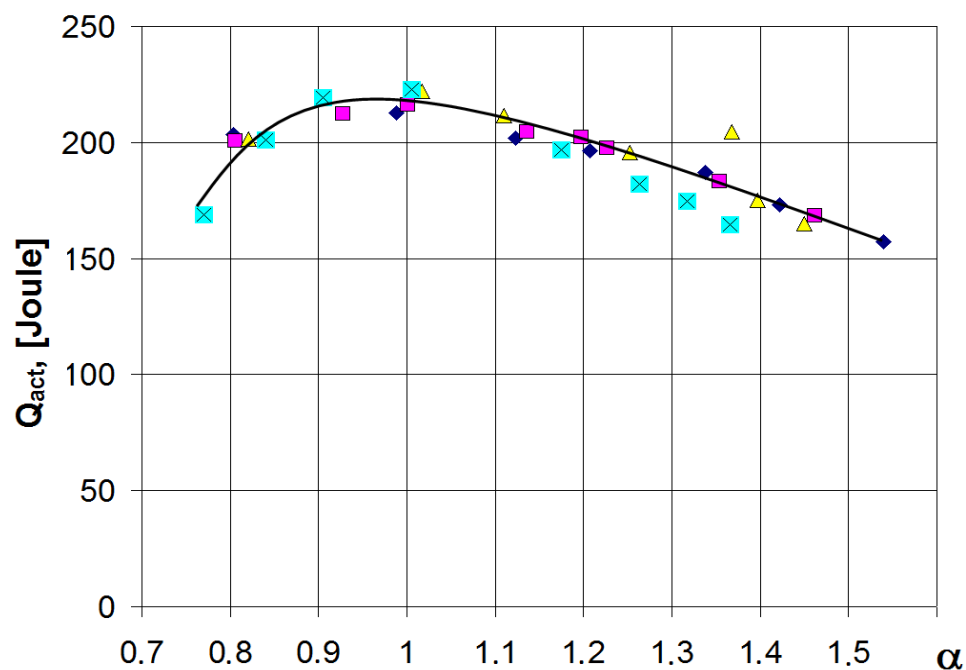


a)

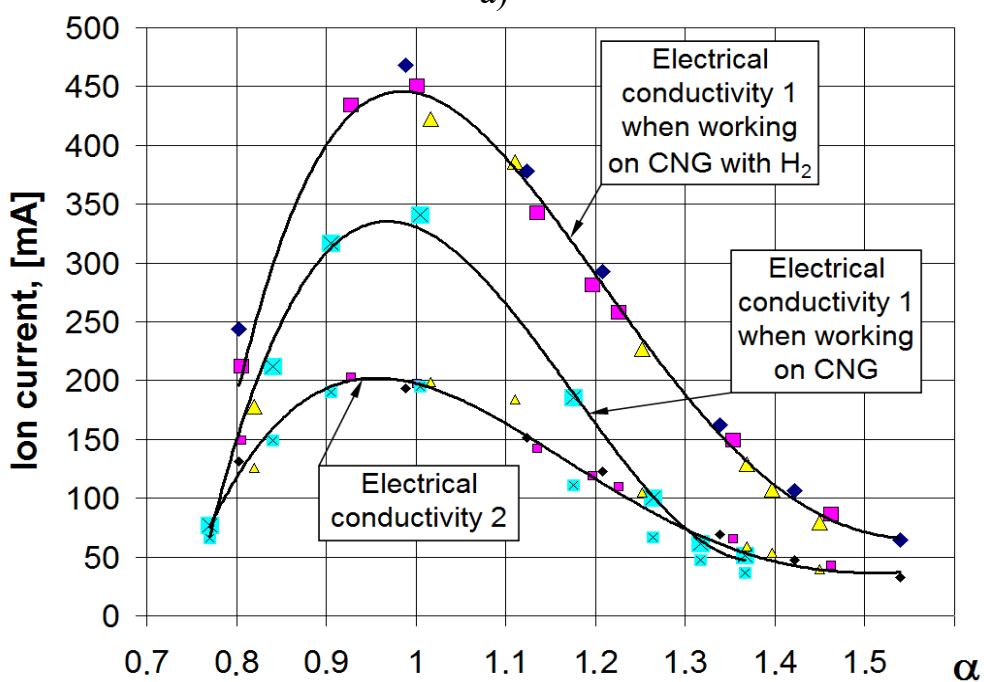


б)

Рисунок 23 – Влияние коэффициента избытка воздуха при составе смеси CNG = 100% на: (а) количество активно выделившегося тепла в процессе сгорания и (б) характеристики электропроводности пламени



a)



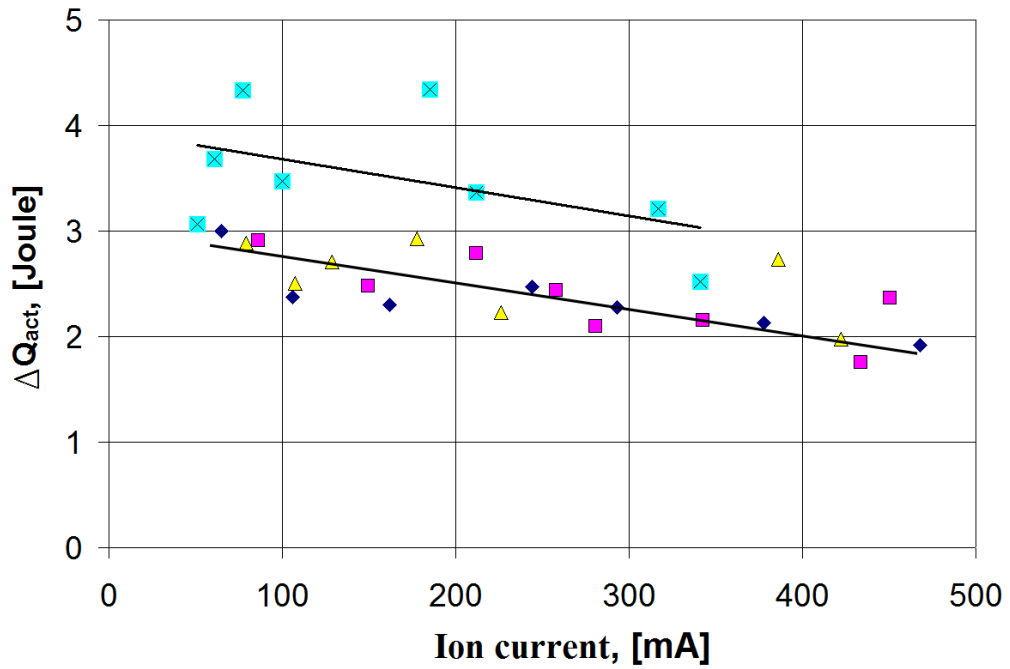
◆ CNG=85%, H₂=15%; ■ CNG=90%, H₂=10%; ▲ CNG=95%, H₂=5%; ◆ CNG=100%;

б)

Рисунок 24 – Зависимость от коэффициента избытка воздуха при варьировании доли водорода: (а) количества активно выделившегося тепла в процессе сгорания; (б) амплитуды ионного тока электропроводности фронта пламени

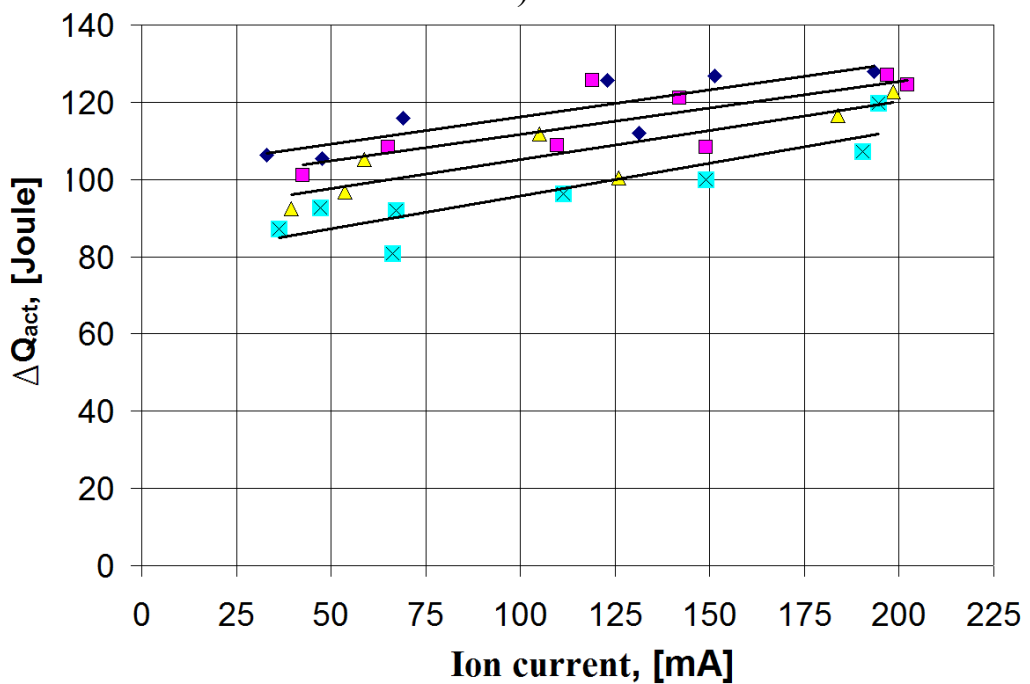
Для 1-го датчика ионизации характерно некоторое уменьшение количества выделившегося тепла от момента воспламенения до появления сигнала на датчике ионизации. По этой причине наблюдается расслоение

между значениями на рисунке 25 при работе на CNG и CNG с добавками водорода.



◆ CNG=85%, H₂=15%; ■ CNG=90%, H₂=10%; ▲ CNG=95%, H₂=5%; ◆ CNG=100%;

а)

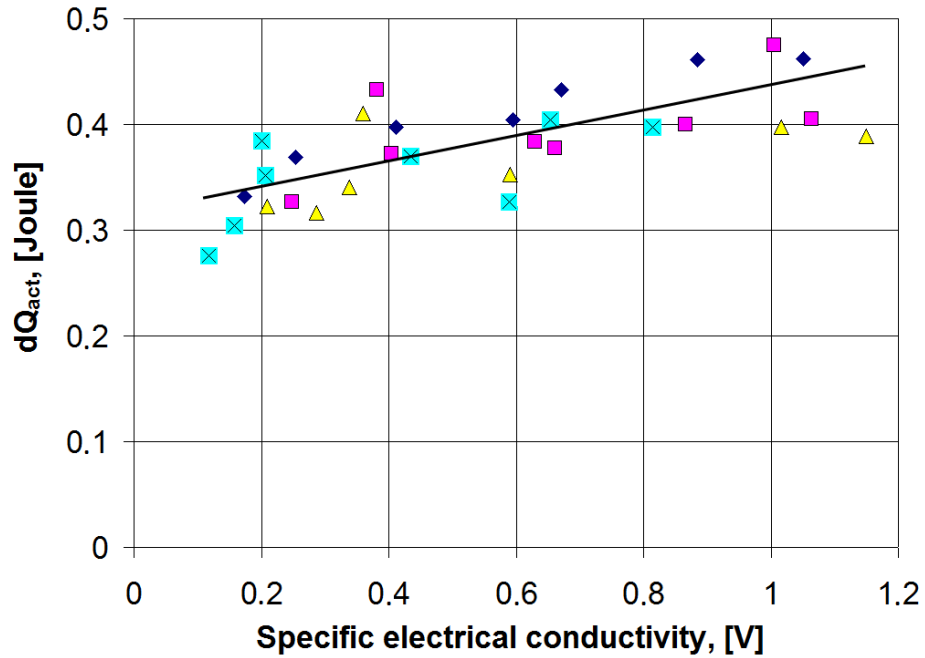


◆ CNG=85%, H₂=15%; ■ CNG=90%, H₂=10%; ▲ CNG=95%, H₂=5%; ◆ CNG=100%;

б)

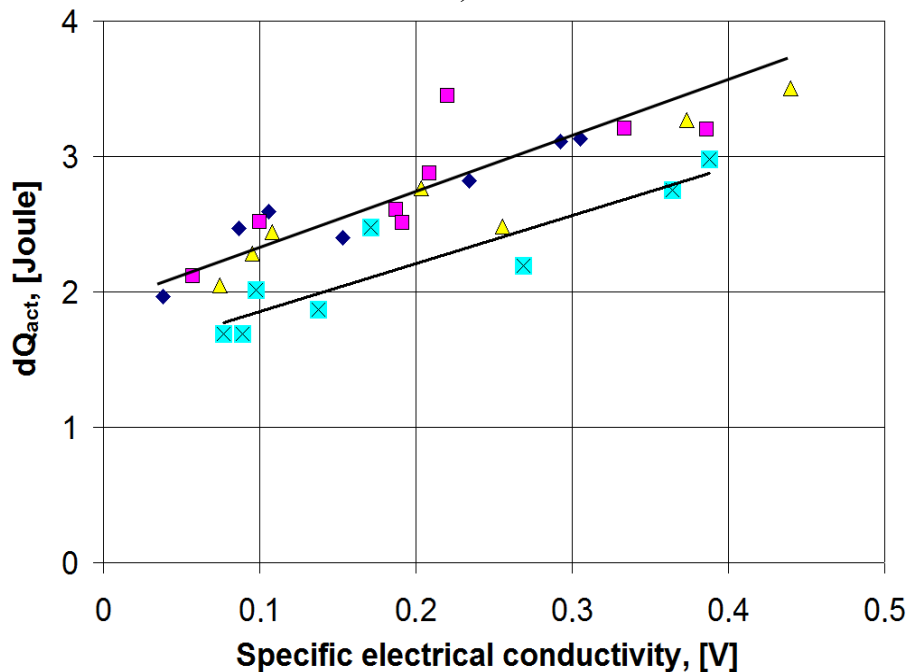
Рисунок 25 – Зависимость количества активно выделившегося тепла в момент появления ионного тока от амплитуды сигнала ионного тока при варьировании доли водорода: (а) на 1-ом датчике ионизации; (б) на 2-ом датчике ионизации

Видно, что увеличение средней величины сигнала ионного тока отражает увеличение средней скорости тепловыделения в зоне датчика ионизации (рисунок 26).



◆ CNG=85%, H₂=15%; ■ CNG=90%, H₂=10%; ▲ CNG=95%, H₂=5%; ◆ CNG=100%;

а)



◆ CNG=85%, H₂=15%; ■ CNG=90%, H₂=10%; ▲ CNG=95%, H₂=5%; ◆ CNG=100%;

б)

Рисунок 26 – Зависимость удельной выделившейся теплоты за время сигнала ионного тока от средней плотности напряжения этого сигнала: (а) на 1-ом датчике ионизации; (б) на 2-ом датчике ионизации

Проведено выявление зависимости величины амплитуды сигнала ионного тока от средней плотности напряжения этого сигнала, приведенная на рисунке 27.

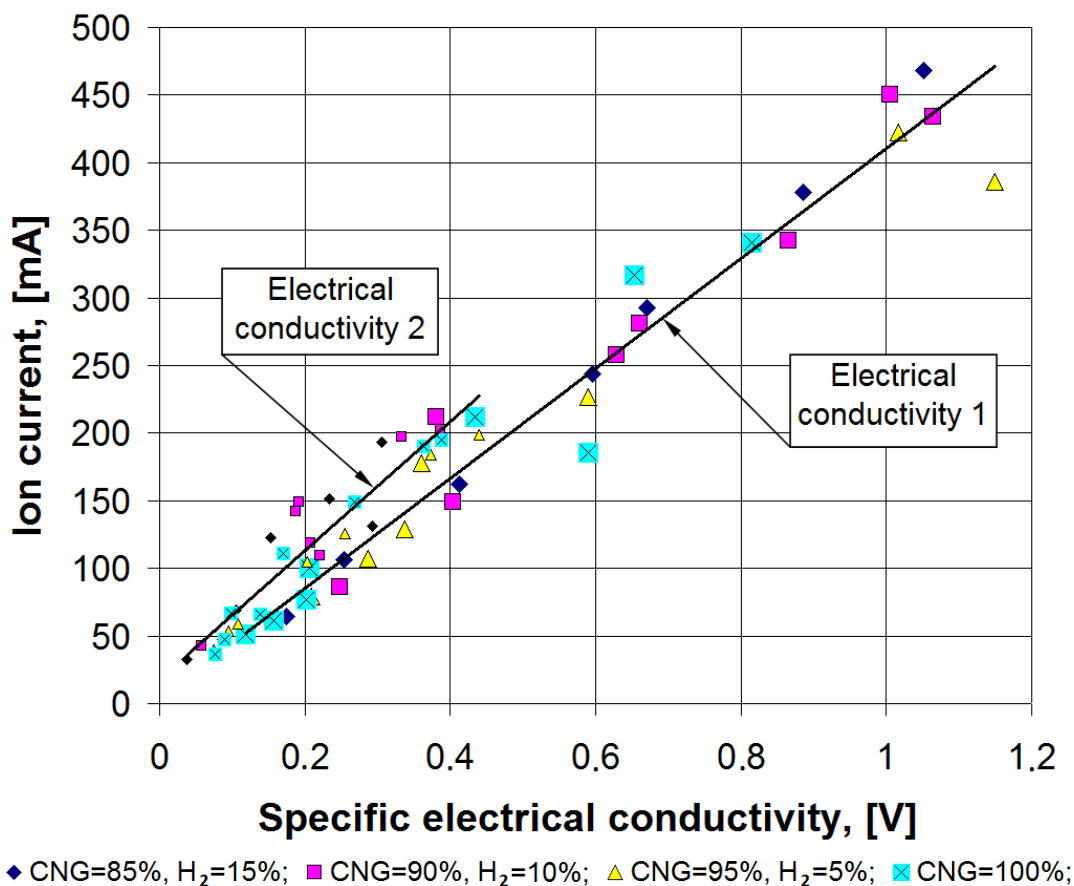


Рисунок 27 – Зависимость величины амплитуды сигнала ионного тока от средней плотности напряжения этого сигнала

Наблюдаемые на рисунке 27 зависимости для датчика ионизации 1 у свечи зажигания и датчика ионизации 2 имеют схожую картину, причем в грубом приближении их можно положить на одну прямую.

4.2 Анализ скорости сгорания при работе исследовательской установки на смеси природного газа и водорода

Проведена оценка влияния добавки водорода с природный газ на среднюю скорость распространения фронта пламени в различных фазах сгорания, приведённые на рисунках 28 и 29.

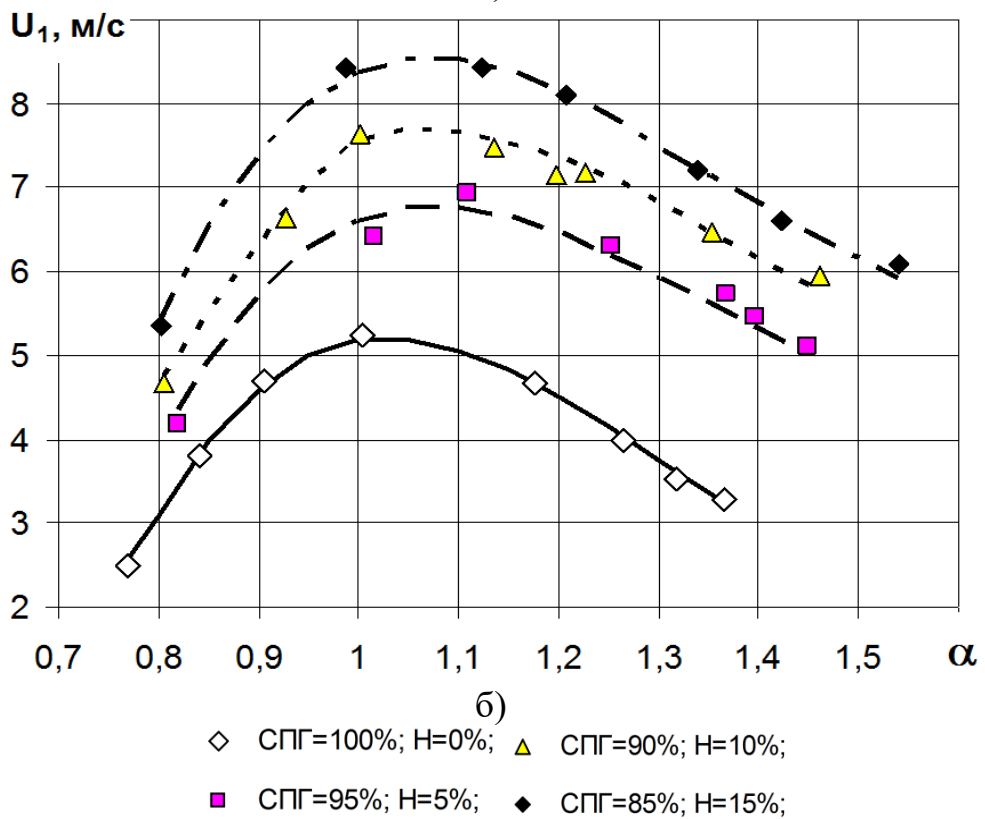
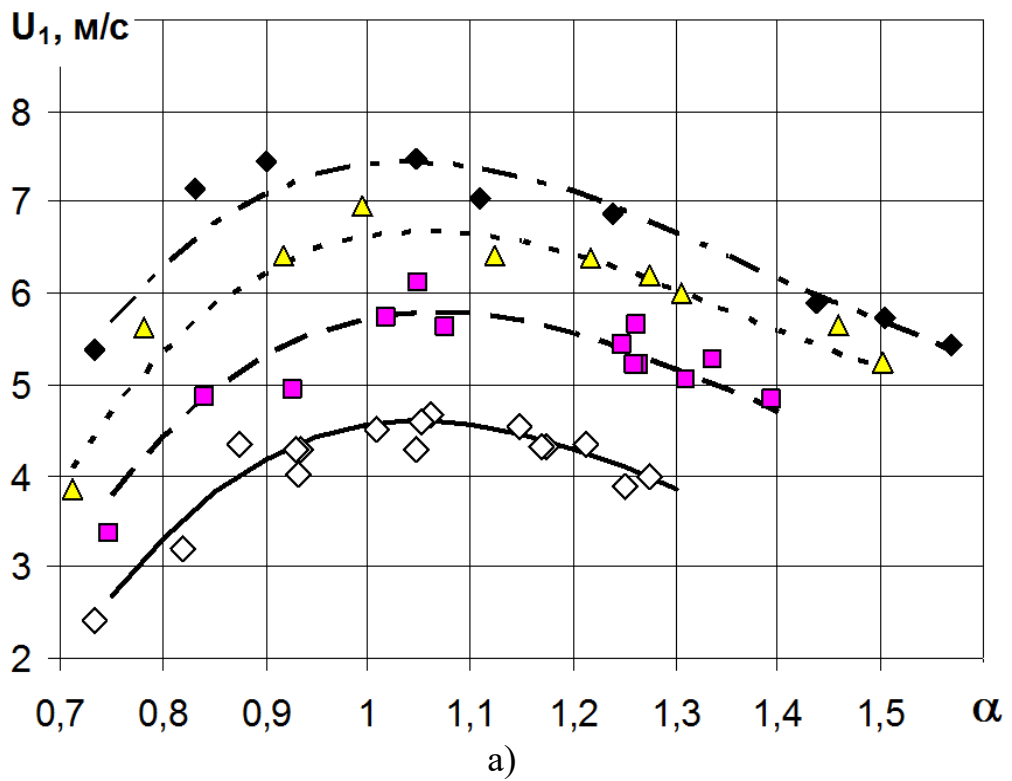
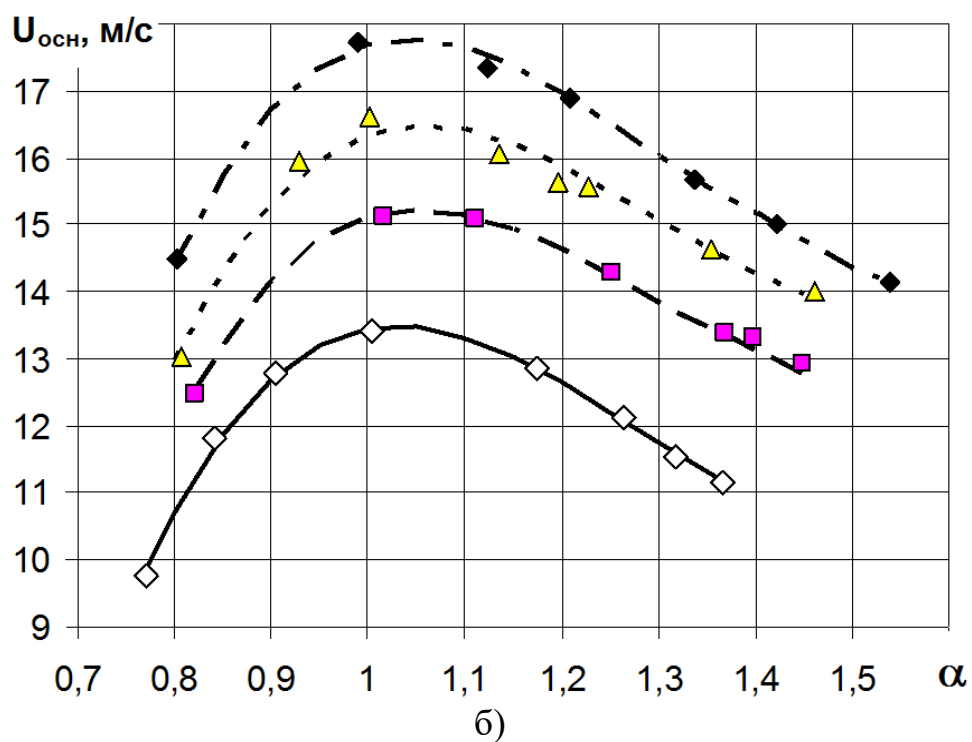
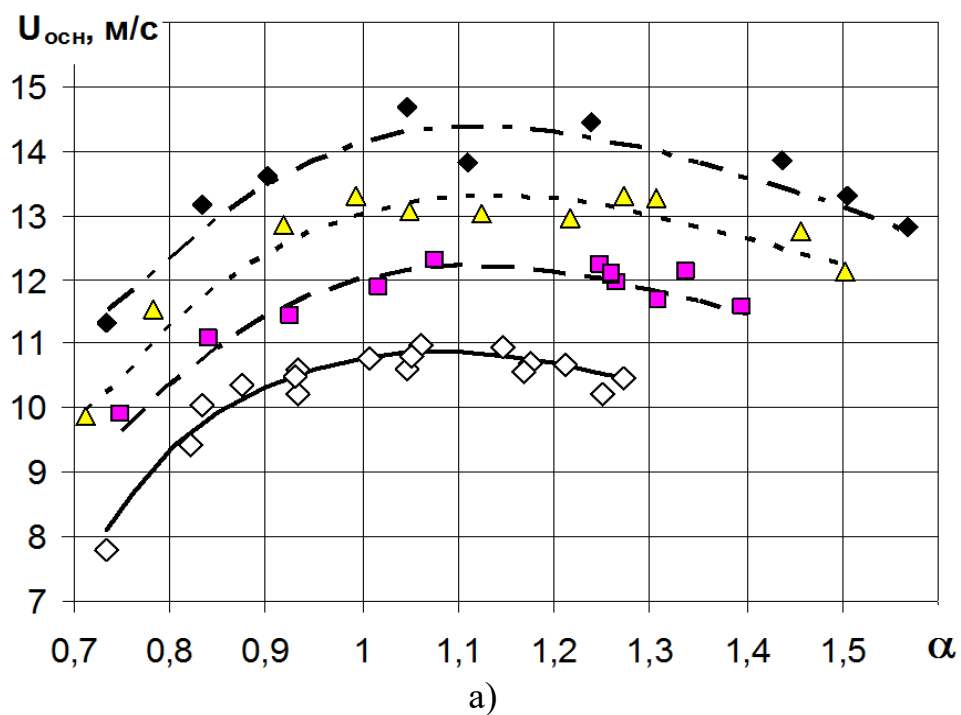


Рисунок 28 – Скорость фронта пламени в 1-ой фазе сгорания от α при работе с долей водорода 0, 5, 10 и 15%. Режим работы: УОЗ = 13°ПКВ, $\varepsilon = 7$: (а) $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; (б) $n = 900 \text{ мин}^{-1}$;

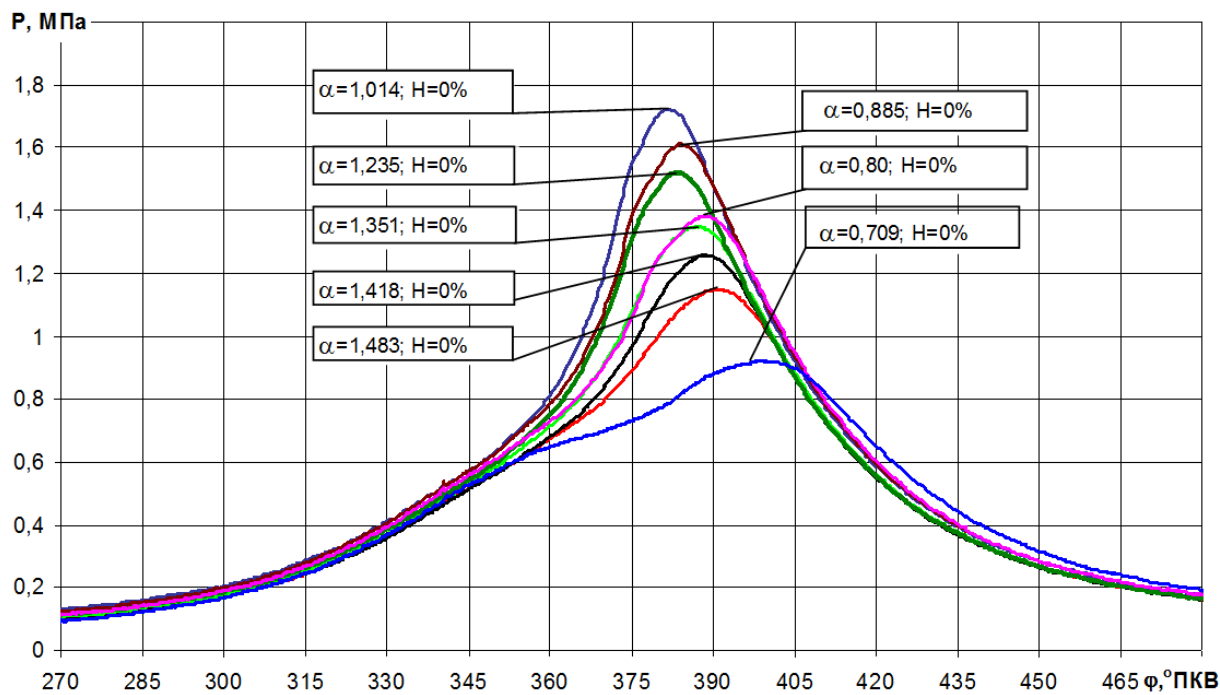


- ◇ СПГ=100%; Н=0%; △ СПГ=90%; Н=10%;
- СПГ=95%; Н=5%; ◆ СПГ=85%; Н=15%;

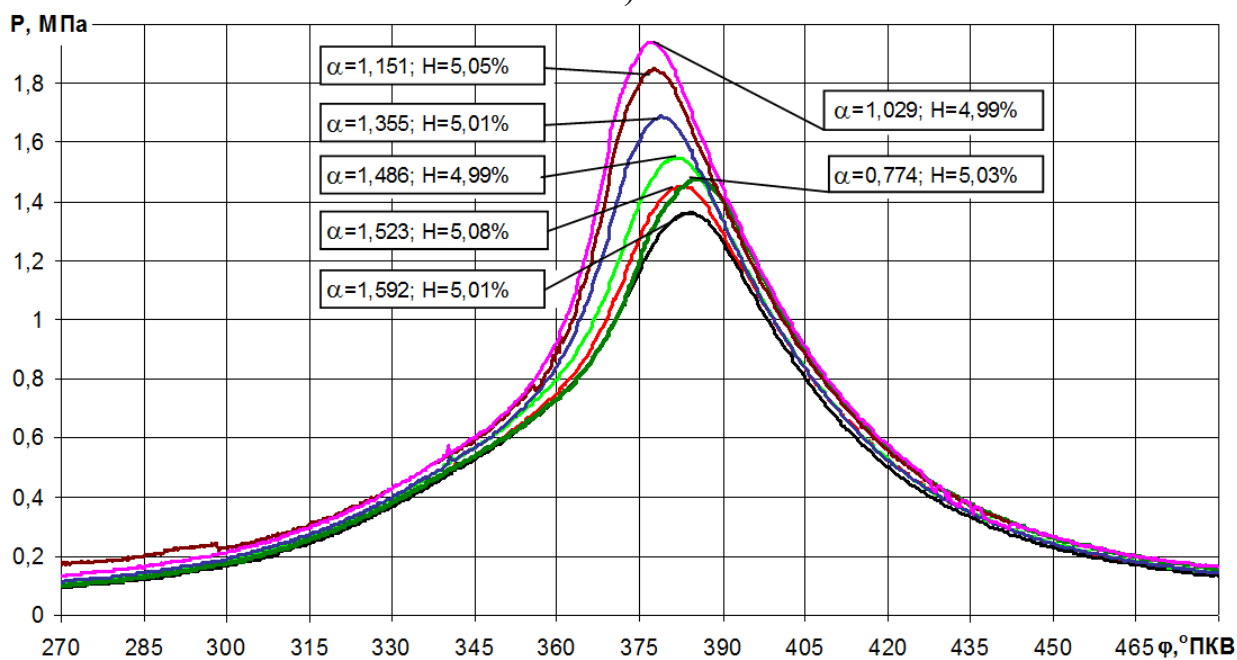
Рисунок 29 – Средние скорости фронта пламени в основной фазе сгорания от α при работе на КПГ с добавкой водорода 0, 5, 10 и 15%. Режим работы: УОЗ = 13°ПКВ, $\varepsilon = 7$: (а) $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; (б) $n = 900 \text{ мин}^{-1}$;

На рисунке 30 и 31 представлены индикаторные диаграммы давления по углу поворота КВ, полученные в процессе сгорания на УИГ-85 на режиме

работы: $\text{УОЗ} = 13^\circ\text{ПКВ}$, $\varepsilon = 7$, $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ для различных коэффициентов избытка воздуха и составов КПГ с долей водорода 0, 5, 10 и 15%.



а)



б)

Рисунок 30 – Индикаторные диаграммы давления по углу поворота КВ в процессе сгорания при различных коэффициентах избытка воздуха и состава топлива: а) СПГ = 100%; б) СПГ = 95%, $\text{H}_2 = 5\%$.

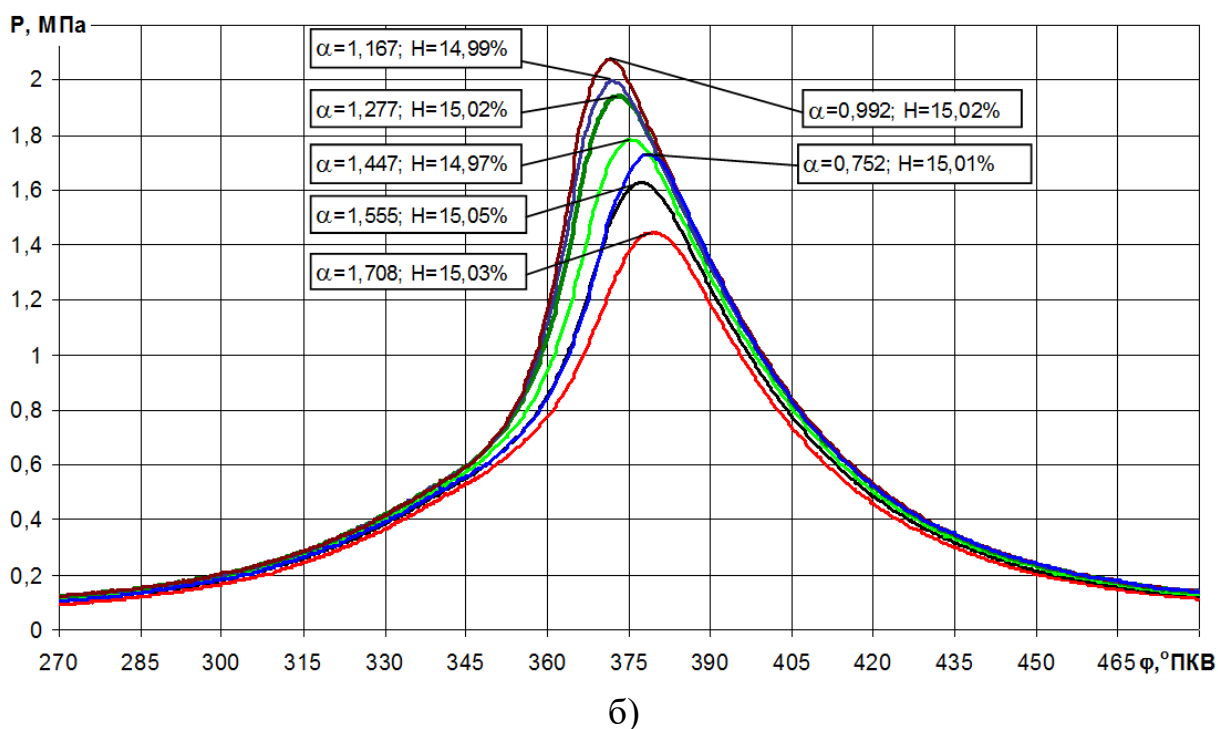
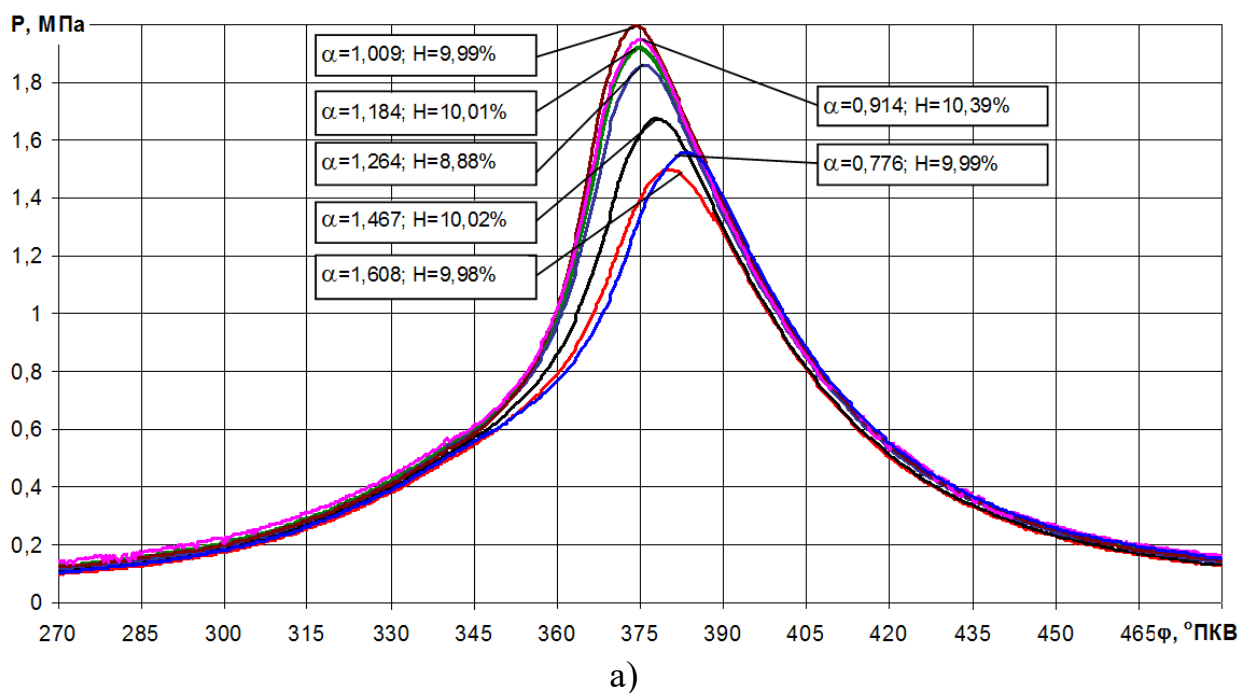
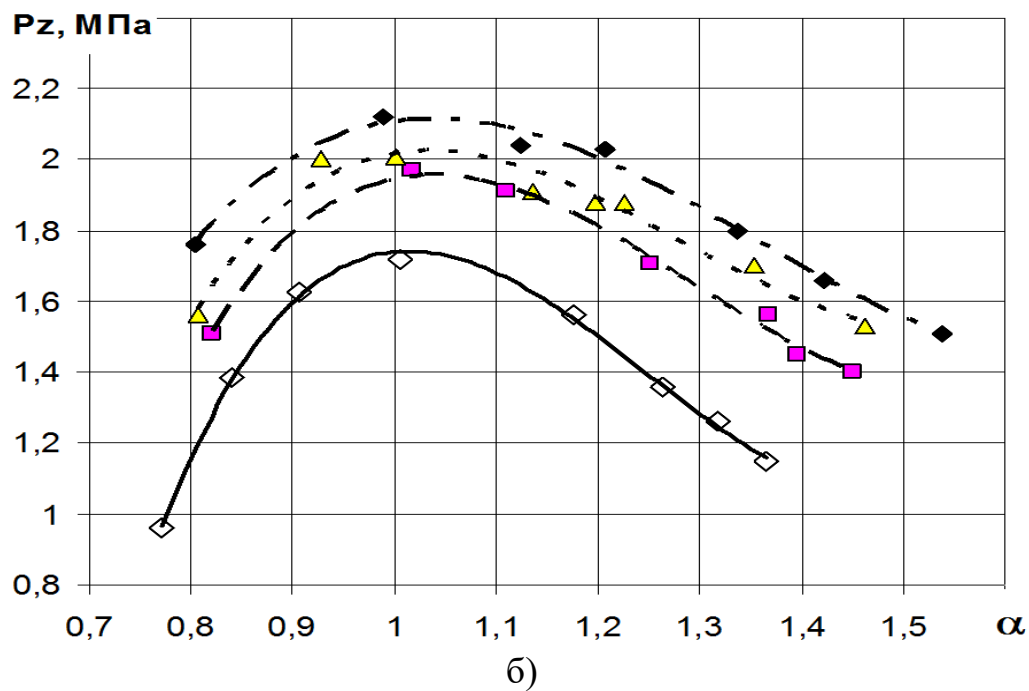
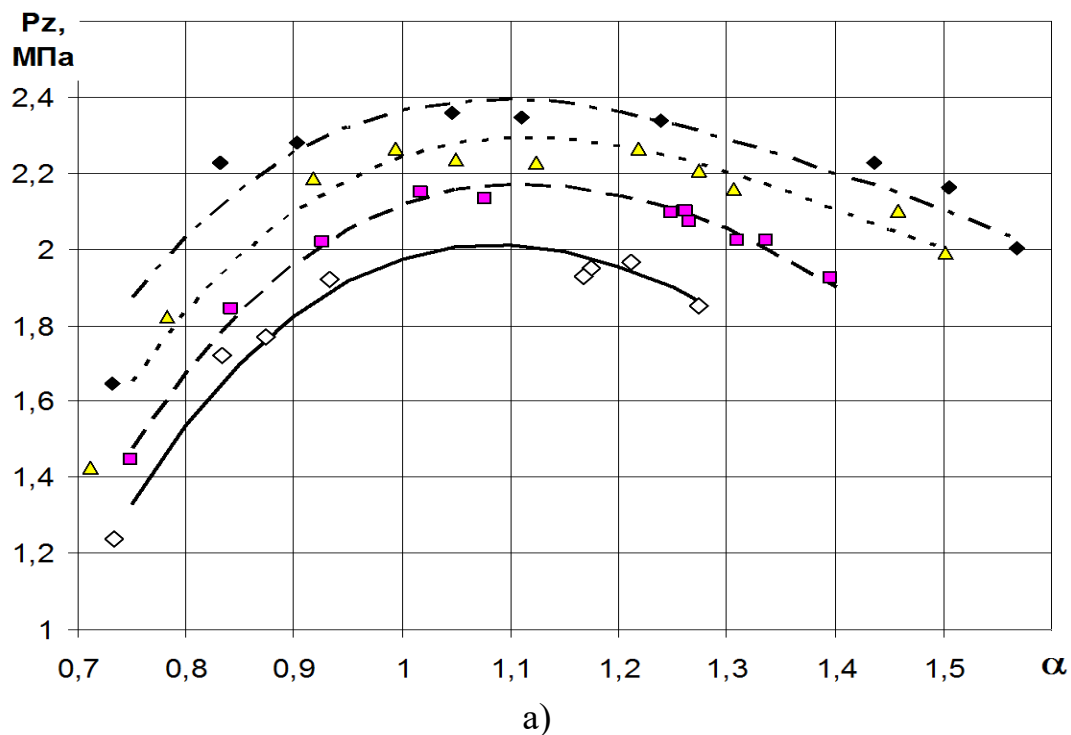


Рисунок 31 – Индикаторные диаграммы давления по углу поворота КВ в процессе сгорания при различных коэффициентах избытка воздуха и состава топлива: а) СПГ = 90%, H_2 = 10%.; б) СПГ = 85%, H_2 = 15%.

Из рисунка 32 показано как, максимальное давление в процессе сгорания повышается примерно на 0.2 МПа в то время, как при увеличении доли водорода ещё на 5% максимальное давление повышается в среднем еще на 0.1 МПа.



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

Рисунок 32 – Максимальное давления в камере сгорания установки УИТ-85

Проведенный анализ индикаторных диаграмм давления показал, что индикаторная работа в цилиндре двигателя УИТ-85 увеличивается при увеличении доли водорода в КПП, что показано на рисунке 33.

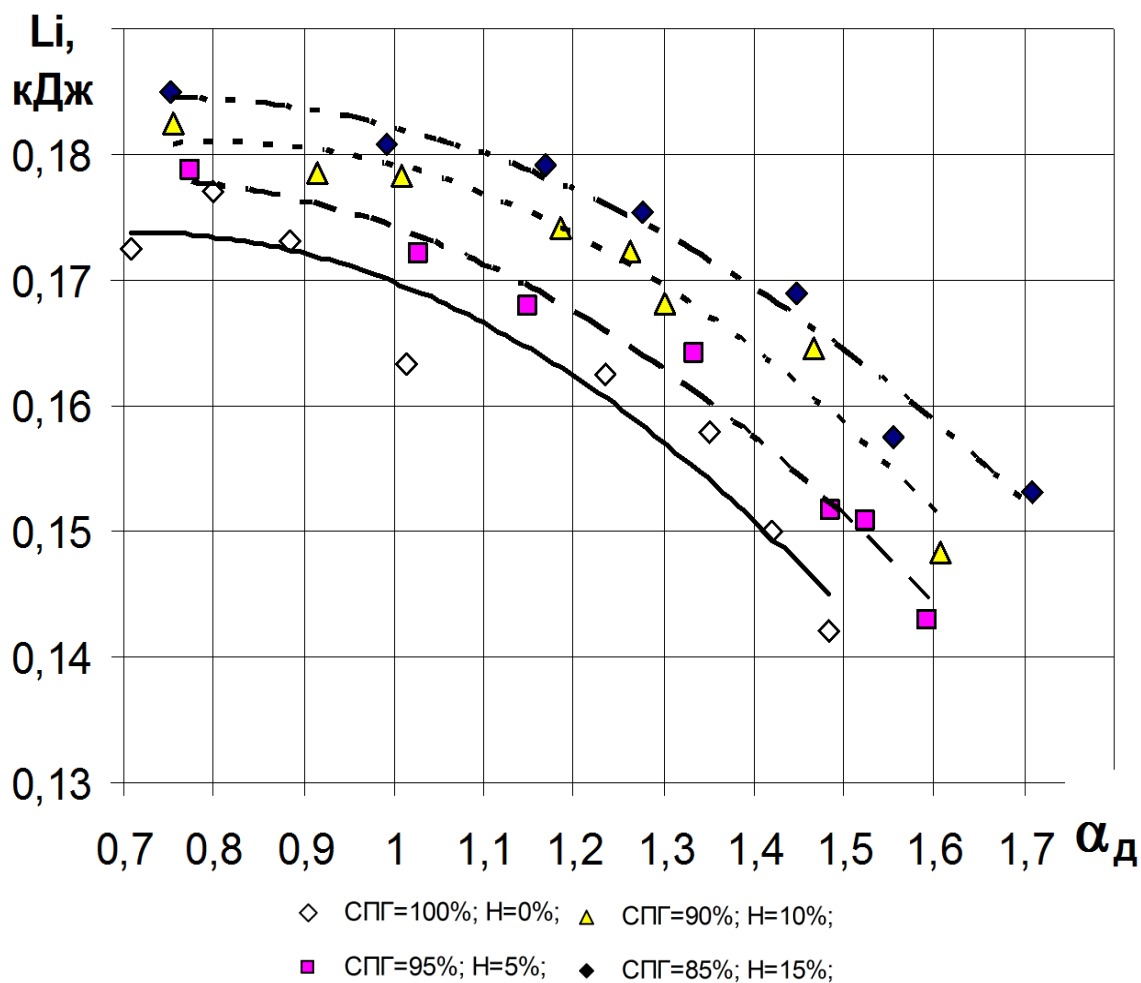


Рисунок 33 – Индикаторной работы в камере сгорания установки УИТ-

Анализ давления в конце впуска (рисунок 34) выявил, что увеличение доли водорода несколько повышает его в среднем на 0,001 и на 0,003 МПа для 900 и 600 мин⁻¹ соответственно, что связано с уменьшением разрежения во впускном канале, но, в тоже время, добавка водорода снижает коэффициент наполнения, вытесняя часть воздуха, что отражено на рисунке 35.

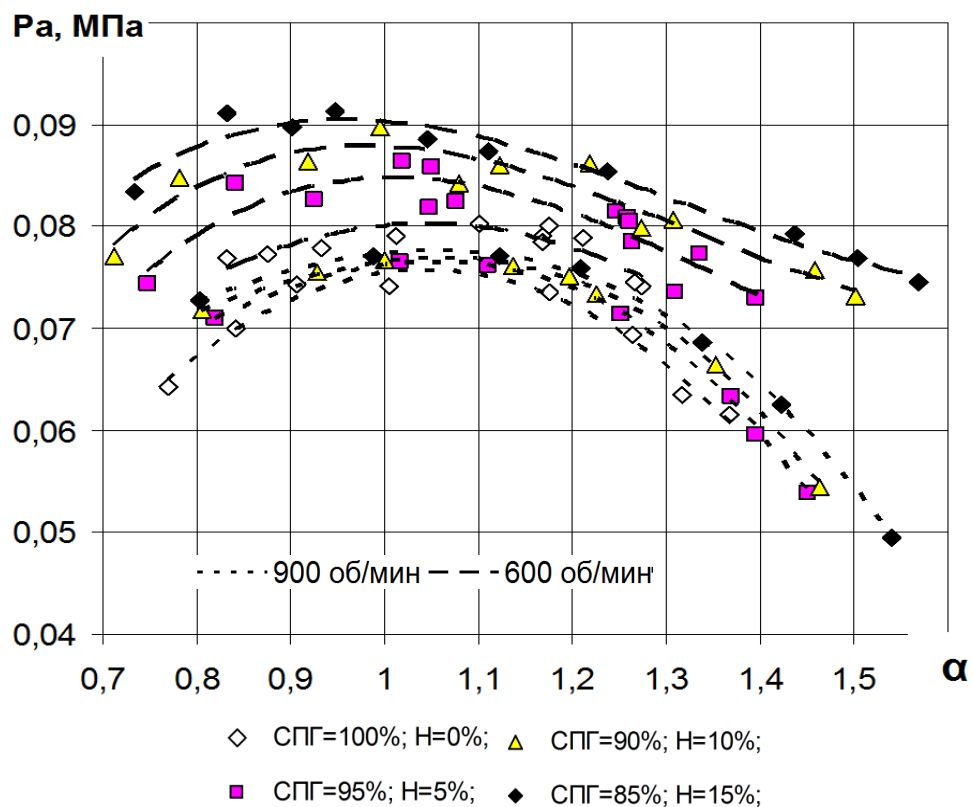


Рисунок 34 – Давления в конце впуска P_a для установки УИТ-85

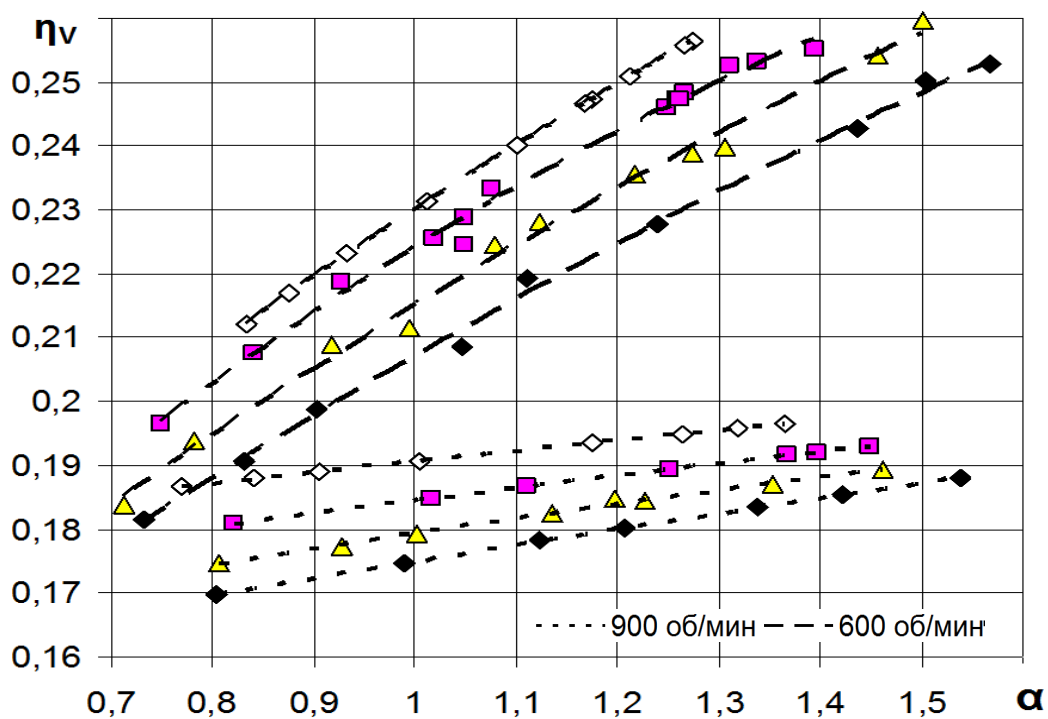


Рисунок 35 – Коэффициента наполнения для установки УИТ-85

Также проведена оценка зависимости подведенной теплоты от коэффициента избытка воздуха и частоты вращения (рисунок 36).

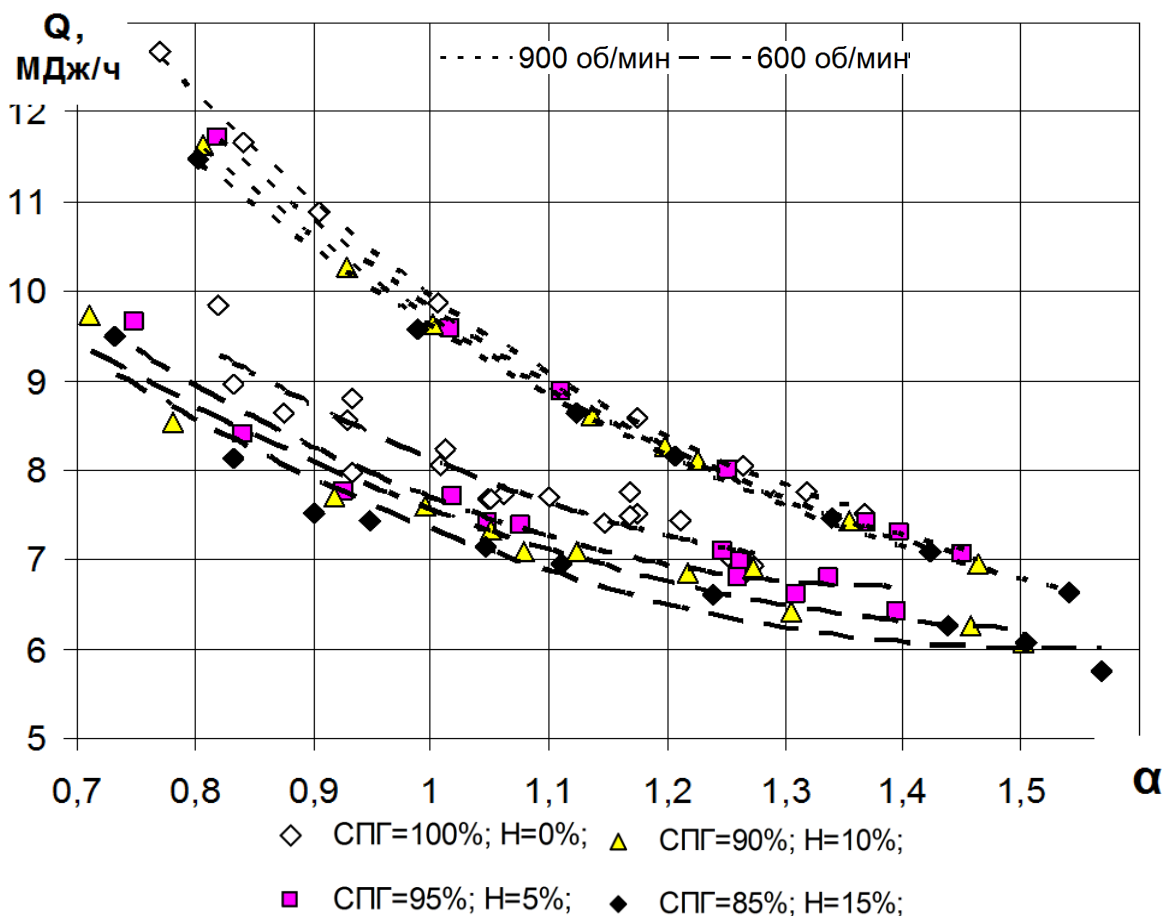


Рисунок 36 – Взаимосвязь количества подведенной теплоты в цилиндре двигателя УИТ-85 от α

4.3 Оценка возможностей повышения эффективности процесса сгорания природного газа при добавке водорода

В результате проведенных экспериментов были получены серии осциллограмм на каждом режиме испытаний, приведенными на рисунке 37. Видим, что водород влияет на межцикловую неидентичность рабочего процесса.

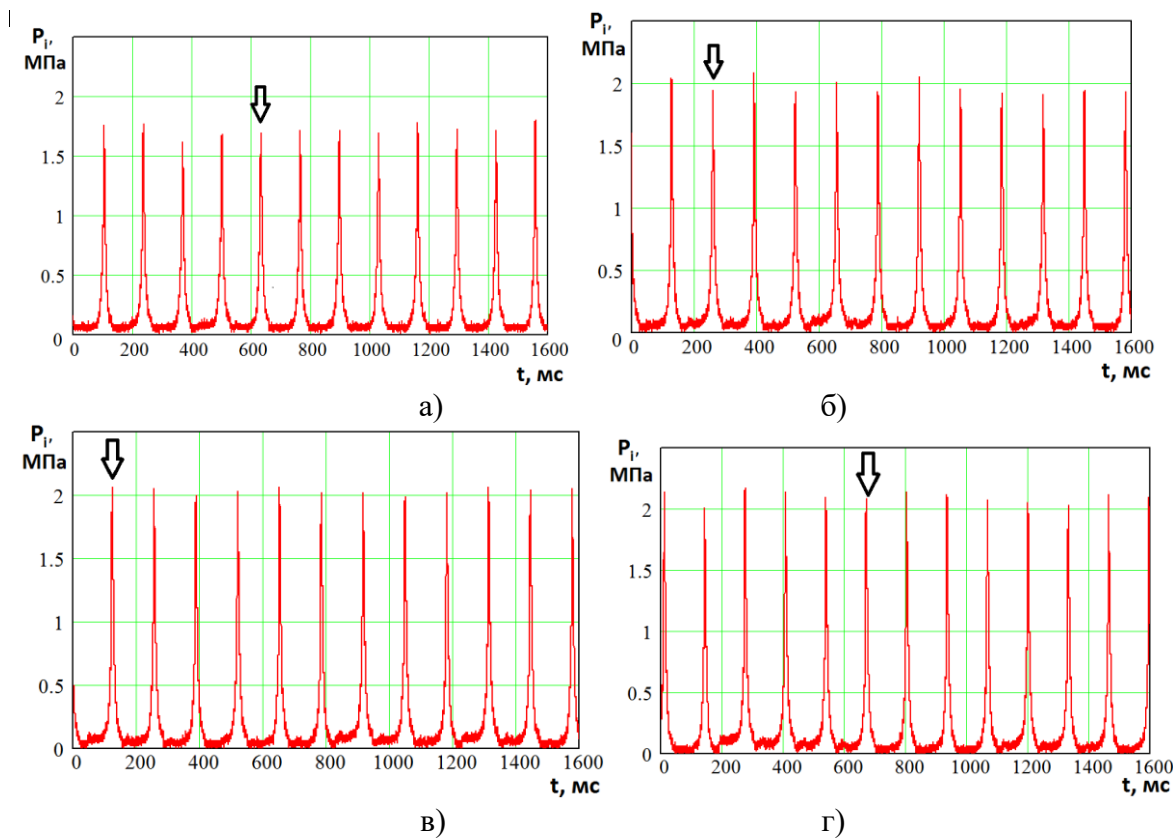


Рисунок 37 – Анализ межцикловою неидентичности рабочего процесса в УИТ-85: (а) СПГ=100%, $\alpha = 1,0052$; (б) СПГ=95,1%, $H_2=4,99\%$, $\alpha = 1,0168$; (в) СПГ=90,01%, $H_2=9,99\%$, $\alpha = 1,009$; (г) СПГ=84,98%, $H_2=15,02\%$, $\alpha = 0,9884$

Выделенные стрелочками циклы на рисунке 37 отдельно рассматривались на предмет анализа интенсивности протекания процессов сгорания при добавке водорода в компримированный природный газ. Результаты такого анализа приведены на рисунках 38, 39, 40 и 41.

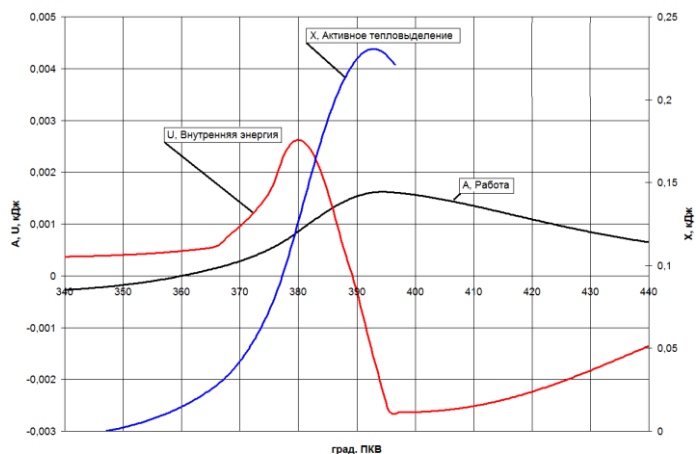


Рисунок 38 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания СПГ=100%, $\alpha = 1,0052$;

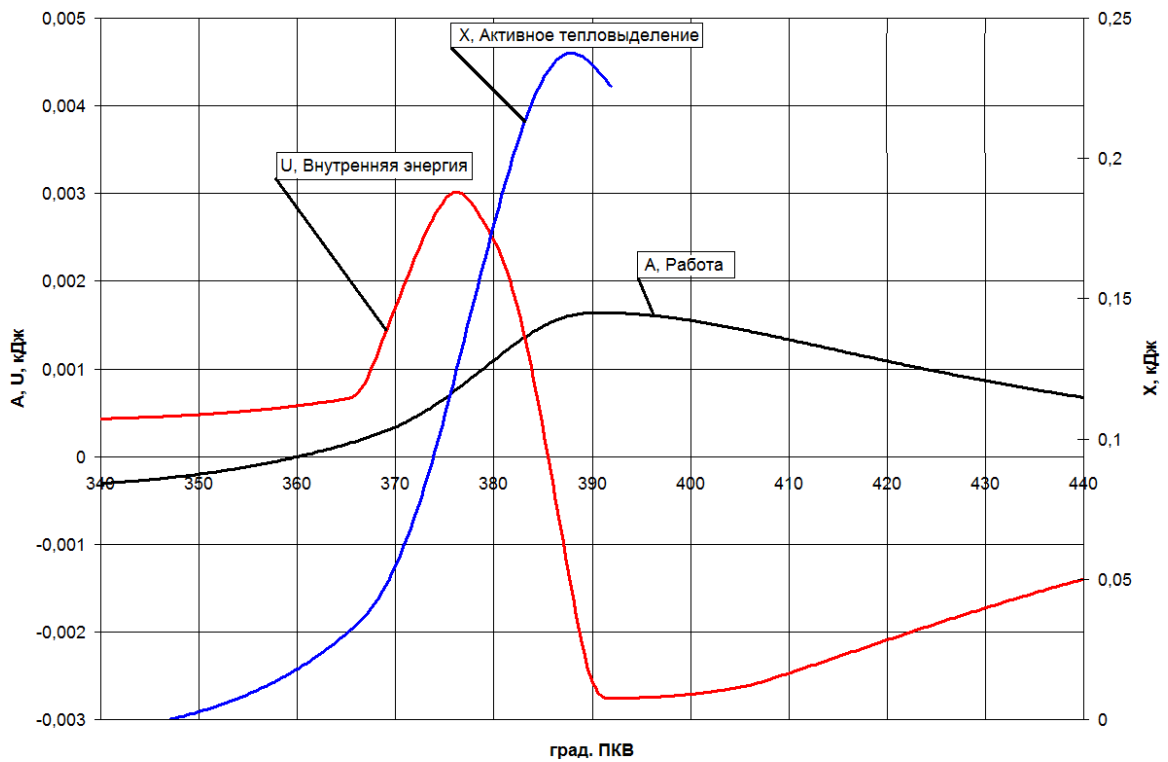


Рисунок 39 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания
 $\text{СПГ}=95,1\%$, $\text{H}_2=4,99\%$, $\alpha = 1,0168$;

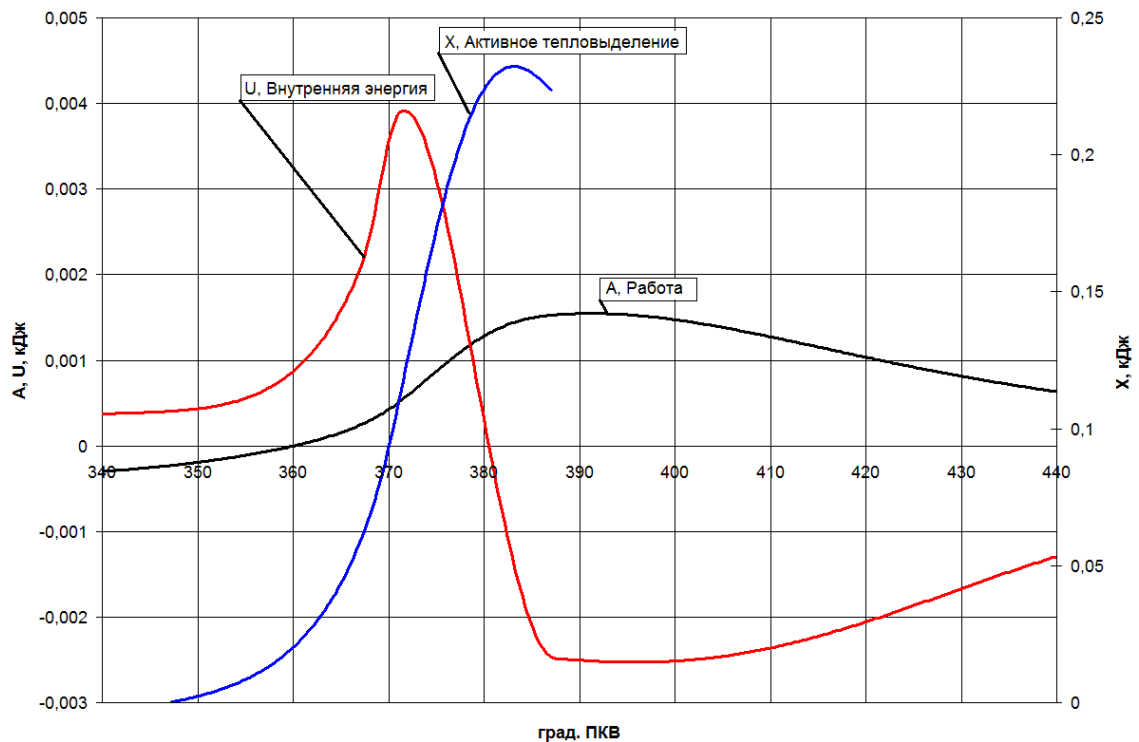


Рисунок 40 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания
 $\text{СПГ}=90,01\%$, $\text{H}_2=9,99\%$, $\alpha = 1,009$

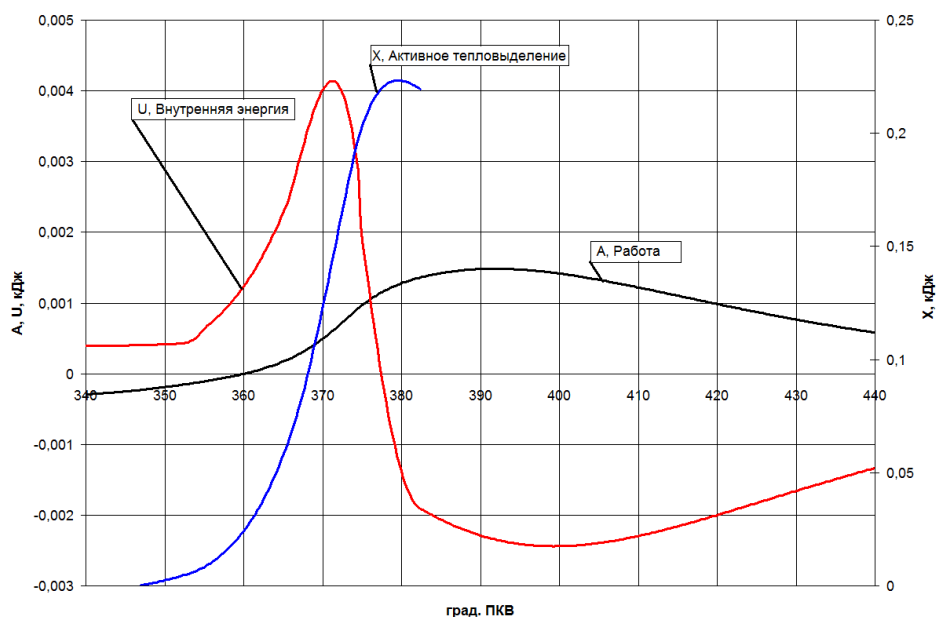


Рисунок 41 – Основные термодинамические параметры процесса сгорания
 $\text{СПГ}=84,98\%$, $\text{H}_2=15,02\%$, $\alpha = 0,9884$

Выводы по главе 4

Обобщая результаты анализа влияния водорода на процесс сгорания природного газа, выделим следующие моменты:

- термодинамический анализ показал наличие корреляционных зависимостей между количеством активно выделившегося тепла в процессе сгорания и характеристиками электропроводности пламени;
- увеличение доли водорода повышает скорость тепловыделения, а, следовательно, и эффективность подвода теплоты;
- увеличение средней величины сигнала ионного тока отражает увеличение средней скорости тепловыделения в зоне датчика ионизации;
- максимальное давление в процессе сгорания повышается примерно на 0.2 МПа в то время, как при увеличении доли водорода ещё на 5% максимальное давление повышается в среднем ещё на 0.1 МПа;
- водород снижает межцикловую неоднородность рабочего процесса.

Заключение

Выполнен анализ перспектив применения водорода в автомобильных силовых установках. Получены следующие основные выводы, а именно:

1. Показана возможность добавления водорода для уменьшения циклических колебаний процесса горения.
2. Экспериментально получено, что добавка водорода в природный газ:
 - Увеличивает скорость тепловыделения.
 - Повышает равномерность рабочего процесса путем уменьшения межциклового не идентичности.
 - Снижает расход топлива причем, также снижается потребность в количестве подведенной энергии.
 - Выявлены корреляционные зависимости параметров сгораний с величиной ионного тока проводимости.

Выводы первой главе изучение литературы.

Обзор научных работ показал, что водород это очень дорогой вид топлива, так что основной проблемой его активного применения в автомобильных двигателях является разработка способов дешевого производства водорода в объемах необходимым для того чтобы можно было рассматривать его как альтернативу базовым топливам. Что приводит к выводу о целесообразности исследовать возможности водорода, как активатора горения основного топлива, причем доля водорода по массе топлива не должна превышать 1-3%.

Показана возможность добавления водорода для уменьшения циклических колебаний процесса горения.

Выводы по главе 2

Проведенный анализ показал, что для объективного исследования процесса сгорания необходимо применять как интегральные методы исследования, например датчик давления, так и локальные позволяющие

оценить влияние состава топливно-воздушно смеси на кинетику химических реакций горения.

Выводы по главе 3

Анализ экспериментальных данных полученных на двигателе ВАЗ-2111 на режиме холостого хода, показал значительное влияние водорода на процесс сгорания природного газа. Так получено, что добавка водорода:

- Увеличивает скорость тепловыделения.
- Повышает равномерность рабочего процесса путем уменьшения межцикловой не идентичности.
- Снижает расход топлива причем, также снижается потребность в количестве подведенной энергии.
- Выявлены корреляционные зависимости параметров сгораний с величиной ионного тока проводимости.

Выводы по главе 4

Обобщая результаты анализа влияния водорода на процесс сгорания природного газа, выделим следующие моменты:

- термодинамический анализ показал наличие корреляционных зависимостей между количеством активно выделившегося тепла в процессе сгорания и характеристиками электропроводности пламени;
- увеличение доли водорода повышает скорость тепловыделения, а, следовательно, и эффективность подвода теплоты;
- увеличение средней величины сигнала ионного тока отражает увеличение средней скорости тепловыделения в зоне датчика ионизации;
- максимальное давление в процессе сгорания повышается примерно на 0.2 МПа в то время, как при увеличении доли водорода ещё на 5% максимальное давление повышается в среднем еще на 0.1 МПа;
- водород снижает межцикловую неидентичность рабочего процесса.

Список используемых источников

1. Автомобиль. Устройство. Автомобильные двигатели: учебное пособие / А. В. Костенко, А. В. Петров, Е. А. Степанова [и др.]. - Изд. 3-е, стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2023. - 436 с.
2. Баширов Р. М. Автотракторные двигатели: конструкция, основы теории и расчета: учебник / Р. М. Баширов. - Изд. 4-е, стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 336 с.
3. Вальехо М. П. Расчет кинематики и динамики рядных поршневых двигателей: учебное пособие / М. П. Вальехо, Н. Д. Чайнов. - Москва: ИНФРА-М, 2022. - 259 с.
4. Вибе И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
5. Гоц А. Н. Динамика двигателей: курсовое проектирование: учеб. пособие / А. Н. Гоц. - 3-е изд., испр. и доп. - Москва: ИНФРА-М, 2020. - 175 с.
6. Конструирование двигателей внутреннего сгорания: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Двигатели внутреннего сгорания" направления подготовки "Энергомашиностроение" / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков; под ред. Н. Д. Чайнова. - 3-е изд. - Москва: Машиностроение, 2023. - 495 с.
7. Крюков К. С. Теория и конструкция силовых установок: учеб. пособие / К. С. Крюков. - Москва: ИНФРА-М, 2021. - 211 с.
8. Курасов В. С. Теория двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособие / В. С. Курасов, В. В. Драгуленко. - Москва: ИНФРА-М, 2021. - 86 с.
9. Петров А. И. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник / А. И. Петров. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2023. - 428 с.

10. Суркин В. И. Основы теории и расчёта автотракторных двигателей: курс лекций: учеб. пособие / В. И. Суркин. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 304 с.
11. Adamchak F., Adede A. LNG as a marine fuel, 17th International conference and exhibition on Liquefied Natural Gas (LNG 17), 2013. Houston
12. Adnan N Ahmed, Zuhair H Obeid and Alauldinn H Jasim Experimental investigation for optimum compression ratio of single cylinder spark ignition engine / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 454 (2018) 012003
13. Adom F., Dunn J.B., Elgowainy A., Han J., Wang M., Chang R., Perez H., Sellers J., Billings R. Life Cycle Analysis of Conventional and Alternative Marine Fuels in GREET. 2013.
14. Agostini A., Giuntoli J., Boulamanti A. Carbon accounting of forest bioenergy - Conclusions and recommendations from a critical literature review. JRC Technical reports, EUR 25354 EN, 2013. ISBN 978-92-79-25100-9.
15. Ahn K., Stefanopoulou A.G. and Jankovic M. Estimation of Ethanol Content in Flex-Fuel Vehicles Using an Exhaust Gas Oxygen Sensor: Model, Tuning and Sensitivity, In proceedings of ASME 2008 Dynamic Systems and Control Conference, October, 2008, Ann Arbor, MI, USA.
16. Anselmo A., Sullivan J. DME: The Best Fuel, Period. Dimethyl Ether: The Future of Electricity, Heat and Transportation. ChemBioPower Ltd. 2015. Available at: www.chembiopower.com/s/CBP-WhitePaper-v5.pdf
17. Antriebskonzepte für heute und morgen. Motorentechnische Zeitschrift MTZ, 09:630–631, 2013.
18. Atwood, P., Gurski, S., Nelson, D. Degree of hybridization modeling of a fuel cell hybrid electric sport utility vehicle. SAE Paper 2001-01-0236. 2001.
19. Aung K., Hassan M., Faeth G. Flame stretch interactions of laminar premixed hydrogen/air flames at normal temperature and pressure. In: Combust. Flame 109 (1997), p. 1–24

20. Bartunek B., Touchette A., Mumford D., Wing R., Hebbes M., Loo C., Clapa D., Welch A. Development of H₂ Direct Injection Technology for High Efficiency / High BMEP Engines. In: 1st Int. Sym. on Hydrogen Internal Combustion Engines Graz University of Technology, Austria, 2006
21. Bell Performance, Fuel Storage and Diesel Generator Problems: Fuel Microbes, 2013. Available at: <http://www.bellperformance.com/bell-performs-blog/diesel-generator-problems-fuel-microbes>
22. Bender R. ANSYS CFX 10 Flow Solver with Extended Coherent Flame Model. In: Internal Report, D3.2.J, EU integrated project HyICE, No. 506604. 2007
23. Bengtsson S., Andersson K., Fridell E. A comparative life cycle assessment of marine fuels; liquefied natural gas and three other fossil fuels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2011. 225, pp. 97–110
24. Benkenida A., Colin O., Knop V. Adaptation of the ECFM Combustion Model to Hydrogen Internal Combustion Engines. In: 1st Int. Sym. on Hydrogen Internal Combustion Engines Graz University of Technology, Austria, 2006
25. Berckmüller M., Rottengruber H., Eder, A., Brehm N., Elsässer G., et al. Potentials of a Charged SI- Hydrogen Engine. In: SAE Paper no. 2003-01-3210 (2003)
26. Boiarciuc A. and Floch A. Evaluation of a 0D Phenomenological SI Combustion Model, SAE 2011-01-1894, 2011
27. Bradley D., Lawes M., Liu K., Verhelst S., Woolley R. Laminar burning velocities of lean hydrogen-air mixtures at pressures up to 1.0 MPa. In: Combust. Flame 149 (2007), p. 162–172
28. Briem M. Untersuchungen zur inneren Gemischbildung an einem Wasserstoff-Forschungsmotor, University of Stuttgart, PhD thesis, 1998

29. Brinkman N., Wang M., Weber T., and Darlington T. Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions, 2005.
30. Burke, A. Hybrid vehicles: design approaches, component options, and potential fuel economy improvements. Institute of Transportation Studies, University of California at Davis. 2005
31. Cavina N. and Suglia R. Spark Advance Control based on a Grey Box Model of the Combustion Process, SAE 2005-01-3760, 2005
32. Colin O. Hydrogen turbulent mixing modeling. In: Internal Report, D3.2.C, EU integrated project HyICE, No. 506604
33. Colin O., Benkenida A., Angelberger C. 3D Modeling of Mixing, Ignition and Combustion Phenomena in Highly Stratified Gasoline Engines. In: Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP 58 (2003), Vol. 1, p. 47–62
34. Conte E. Combustion of reformer gas/gasoline mixtures in spark ignition engines: A concept for near-zero emission transportation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, PhD thesis, 2006
35. Corvus Energy Announces Investment from Statoil Technology Invest. 2015.
36. Cowie A., Berndes G., Smith T. On the timing of greenhouse gas mitigation benefits of forest-based bioenergy, IEA Bioenergy, 2013. ExCo 2013:04
37. Deniz C., Kilic A., Civkaroglu G. Estimation of shipping emissions in Candarli Gulf, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment. 2010. Vol.171, pp.219–228.
38. DNV GL Alternative fuels for shipping. DNV GL Strategic Research & Innovation Position 2014. Paper 1-2014.
39. Dorer F. Kompressionsmaschine zur Simulation von Brennraumvorgängen in Wasserstoff-Großdieselmotoren, Technical University Munich, PhD thesis, 2000
40. Eckstein L., Gobbels R., and Wohlecker R. Benchmarking of the Electric Vehicle Mitsubishi i-MiEV. ATZ worldwide, 12:48–53, 2011.

41. Eder A. Brennverhalten schallnaher und überschall-schneller Wasserstoff-Luft Flammen, Technical University Munich, PhD thesis, 2001
42. Eichlseder H. and Wimmer A. Potential of IC-engines as minimum emission propulsion system. *Atmospheric Environment*, 37:5227–5236, 2003.
43. Ellgas S. Simulation of a Hydrogen Internal Combustion Engine with Cryogenic Mixture Formation, University of Armed Forces, Munich, PhD thesis, 2007
44. Erren R., Campbell W. Hydrogen: A Commercial Fuel for Internal Combustion Engines and Other Purposes. In: *The Institute of Fuel* 29 (1933), p. 277–290
45. Errico G. D., Onorati A., Ellgas S., Obieglo A. Thermo-Fluid Dynamic Simulation of a S.I. Single-Cylinder H₂ Engine and Comparison with Experimental Data. In: *Proceedings of ICES2006 ASME Internal Combustion Engine Division, Spring Technical Conference (2006)*, May 8-10
46. Ferreira J., Bender R., Forkel H. Flamelet Modelling of Partially Premixed Hydrogen Combustion in a Direct Fuel Injection Engine. In: *1st Int. Sym. on Hydrogen Internal Combustion Engines* Graz University of Technology, Austria, 2006
47. Florentinus A., Hamelinck C., van den Bos A., Winkel R., Cuijpers M. Potential of biofuels for shipping - Final Report. Prepared by Ecofys for European Maritime Safety Agency (EMSA). 2012.
48. Furuhashi S. Hydrogen engine systems for land vehicles. In: *Int. J. Hydrogen Energy* 14 (1989), Vol. 12, p. 907–913
49. Gerbig F., Strobl W., Eichlseder H., Wimmer A. Potentials of the Hydrogen Combustion Engine with innovative Hydrogen specific Combustion Processes. In: *FISITA World Automotive Congress*. Barcelona, 2004
50. Gerke U., Boulouchos K., Wimmer A., Kirchweyer W. Analysis of Hydrogen Direct-Injection Internal Combustion Engines with Methods of Computational Fluid Dynamics. In: *Diesel- und Benzin- direkteinspritzung, IV Bd. 77*. Haus der Technik, Berlin, 2006

51. Guerrier, M. and Cawsey, P. The Development of Model Based Methodologies for Gasoline IC Engine Calibration, SAE Technical Paper 2004-01-1466, 2004
52. Hasse C. A Two-Dimensional Flamelet Model for Multiple Injections in Diesel Engines, RWTH Aachen, PhD thesis, 2004
53. Heffel J. W. NO_x emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation. International Journal of Hydrogen Energy, 2003. 28(8), pp. 901-908.
54. Heller K., Ellgas S. Optimisation of a Hydrogen Internal Combustion Engine with Cryogenic Mixture Formation. In: 1st Int. Sym. on Hydrogen Internal Combustion Engines Graz University of Technology, Austria, 2006
55. Henning G., Godecke T., and Damm A. Neue Getriebe für die neuen Kompakten. ATZ, 9:70–73, 2012.
56. Heywood J. B., Internal Combustion Engines Fundamentals, McGraw and Hill, 1988
57. Ishiyama T., Kang J., Ozawa Y., and Sako T. Improvement of Performance and Reduction of Exhaust Emissions by Pilot-Fuel-Injection Control in a Lean-Burning Natural-Gas Dual-Fuel Engine. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 5:243–253, 2012.
58. Jiang, S., and Nutter, D. Implementation of Model-Based Calibration for a Gasoline Engine, SAE 2012-01-0722, 2012
59. Landalv I., Gebart R., Marke B., Granberg F., Furusjo E., Lownertz P., Öhrman O.G.W., Sørensen E. L., Salomonsson P. Two years experience of the BioDME project – a complete wood to wheel concept. Environmental Progress and Sustainable Energy. 2014. Vol.33, pp. 744–750.
60. Lin C.Y. Effects of biodiesel blend on marine fuel characteristics for marine vessels. Energies. 2013. Vol.6, pp.4945–4955
61. Lindström, F., Ångström, H., Kalghatgi, G., and Möller, C., An Empirical SI Combustion Model Using Laminar Burning Velocity Correlations, SAE Technical Paper, 2005-01-2106, 2005

62. Lipman, T., and Hwang, R. Hybrid electric and fuel cell vehicle technological innovation: hybrid and zero-emission vehicle technology links. Proceedings of the 2003 20th International Electric Vehicle Symposium and Exposition, Long Beach, CA.
63. Longwic, R., Modelling the Combustion Process in the Diesel Engine with the Use of Neural Networks, SAE Technical Paper 2008-01-2446, 2008, doi:10.4271/2008- 01-2446.
64. Maass, B., Deng, J., and Stobart, R., In-Cylinder Pressure Modelling with Artificial Neural Networks, SAE Technical Paper 2011-01-1417, 2011, doi:10.4271/2011-01-1417.
65. Miller, J. Hybrid Electric Vehicle Propulsion System Architectures of the e-CVT Type. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006. 21(3), pp. 756-767.
66. O'Dowd C. Aerosol in Global Atmosphere. In Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Robert A. Meyers (Ed). 2012. pp 111-148. Springer New York
67. Ott T., Onder C., and Guzzella L. Hybrid-Electric Vehicle with Natural Gas-Diesel Engine. Energies, 6:3571–3592, 2013.
68. Ott T., Zurbriggen F., Onder C., and Guzzella L. Cycle-averaged efficiency of hybrid electric vehicles. Institution of Mechanical Engineering Part D, Journal of Automobile Engineering, 227:78–86, 2012.
69. Petzold A., Lauer P., Fritsche U., Hasselbach J., Lichtenstern M., Schlager H., Fleischer F. Operation of marine diesel engines on biogenic fuels: modification of emissions and resulting climate effects. Environmental Science and Technology. 2011. Vol. 45, pp.10394– 10400.
70. Prucka R. An Experimental Characterization of a High Degree of Freedom Spark- Ignition Engine to Achieve Optimized Ignition Timing Control, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, 2008
71. Rakopoulos, C., Michos, C., and Giakoumis, E., Thermodynamic Analysis of SI Engine Operation on Variable Composition Biogas-Hydrogen

Blends Using a Quasi-Dimensional, Multi-Zone Combustion Model, SAE Int. J. Engines 2(1):880-910, 2009

72. Romm, J.J. The Hype About Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate, Island Press, Washington, D.C. 2004.

73. Schmid, A., Grill, M., Berner, H., Bargende, M., et al. Development of a Quasi- Dimensional Combustion Model for Stratified SI-Engines, SAE Int. J. Engines 2(2):48-57, 2010

74. Schmidt T., Weiskirch C., Lieske S., and Manz H. Modern industrial engines emission calibration and engine management. ATZ off highway, 9:24–35, 2010.

75. Schneeweiss B. and Teiner P. Hardware-in-the-Loop-Simulation am Motorenprufstand fur realitatsnahe Emissions- und Verbrauchsanalysen. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, 5:76–79, 2010.

76. Sciaretta A. Supervisory control of hybrid powertrains: An experimental benchmark of offline optimization and online energy management. Control Engineering Practice, 19:1253–1265, 2011.

77. Semin R.A.B. A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines. Am. J. Engg. & Applied Sci, 1:302–311, 2008.

78. Serrano D. and Lecointe B. Exploring the Potential of Dual Fuel Diesel-CNG Combustion for Passenger Car Engine. In Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Beijing, China, 27-30 November 2012.

79. Service, R. F. The hydrogen backlash. Science, 2004. 305(5686), Aug 13, pp. 958-961.

80. Sherrard A. Poly-gen flash pyrolysis praised for rapid roll-out. Bioenergy International 2015. 78(2). Pp 18-19

81. Tan, Z. and Reitz, R. Modeling Ignition and Combustion in Spark-ignition Engines Using a Level Set Method, SAE Technical Paper 2003-01-0722, 2003.

82. Thomson H., Corbett J. J., Winebrake J.J. Natural gas as a marine fuel. *Energy Policy* 2015. 87. pp 153–167
83. Vibe, I.I. Semi-empirical expression for combustion rate in engines, *Proceedings of Conference on piston engines, USSR Academy of sciences, Moscow*, pp. 186-191, 1956.
84. Warnecke W., Karanikas J., Levell B., Mesters C., Adolf J., Schreckenber J., Kofod M., and Wildbrand K. Natural Gas - A bridging technology for future mobility? In *34. Internationales Wiener Motorensymposium*, 25 - 26, April, 2013.
85. Wiebe I.I., *Brennverlauf und Kreisprozeb von Ver-brennungsmotoren*. In VEB- Verlag Technik, Berlin, 1970.
86. Zhang, Y., Lin, H., Zhang, B., and Mi, C. Performance Modeling and Optimization of a Novel Multi-mode Hybrid Powertrain. *Journal of Mechanical Design*, 2006. 128, pp. 79-89.