

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)
13.04.03 Энергетическое машиностроение
(код и наименование направления подготовки)
Энергетические комплексы и системы управления
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Выявление возможностей повышения эффективности газового ДВС за счет контроля процесса сгорания по электропроводности пламени

Студент А.Н. Корнилов (личная подпись)
(И.О. Фамилия)

Научный руководитель В.А. Шишков (личная подпись)
(И.О. Фамилия)

Консультанты В.В. Смоленский (личная подпись)
(И.О. Фамилия)

Руководитель программы к.т.н., доцент Д.А. Павлов (личная подпись)
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

« _____ » _____ 2019 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент, Д.А. Павлов (личная подпись)
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

« _____ » _____ 2019 г.

Тольятти 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке наличия взаимосвязи электропроводности пламени с эффективностью рабочего процесса газового ДВС	6
1.1 Обзор литературных источников по возможности применения электропроводности пламени для диагностики и управления ДВС ...	8
1.2 Процессы ионизации при сгорании	14
1.2.1 Общие положения.....	14
1.2.2. Химио-ионизация.....	16
1.2.3. Термическая ионизация.....	17
1.2.4 Электронное присоединение.....	18
1.3 Перспективы применения явления электропроводности пламени в ДВС	20
1.4 Выводы по разделу «Изучение литературы для выявления и оценке наличия взаимосвязи электропроводности пламени с эффективностью рабочего процесса газового ДВС»	30
ГЛАВА 2 Описание экспериментального оборудования и план проведения экспериментальных исследований.....	31
2.1 Экспериментальная установка	32
ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.....	41
3.1 Результаты экспериментальных исследований	41
Глава 4 Выявление возможностей повышения эффективности газового ДВС за счет контроля процесса сгорания по электропроводности	

пламени	51
Заключение.....	62
Список используемых источников.....	64

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Исследование рабочих процессов ДВС является неотъемлемой частью современной методологии проектирования и доводки новых двигателей внутреннего сгорания. Разработанные на сегодняшний день математические модели используют значительный объем экспериментальных данных для верификации и калибровки. Одним из путей создания уточненных моделей сгорания является использование экспериментальных данных о процессе сгорания, полученных с помощью явления электропроводности пламени.

Электропроводность пламени углеводородов обусловлена значительной концентрацией заряженных частиц (электронов и ионов) во фронте пламени вследствие особенностей протекания сложных реакций окисления углеводородных топлив. При прохождении фронта пламени электродов ионизационного датчика в электрической цепи датчика появляется ток, который принято называть ионным.

Также явление электропроводности пламени может быть использовано в системах контроля и управления двигателями систем бортовой диагностики двигателя. В настоящее время с помощью данного явления в условиях камеры сгорания ДВС получают информацию о наличии пламени и скорости его распространения.

Одним из наиболее сложных процессов, происходящих в условиях поршневого ДВС, является процесс сгорания. Недостаточная разработанность химии горения углеводородов обуславливает использование сложных способов получения информации о процессе сгорания в условиях поршневых ДВС.

Целью работы является выявление возможностей повышения эффективности газового ДВС за счет контроля процесса сгорания по электропроводности пламени.

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

1. провести оценку наличия взаимосвязи электропроводности пламени с эффективностью рабочего процесса газового ДВС.
2. выявить возможности повышения эффективности газового ДВС за счет контроля процесса сгорания по электропроводности пламени.

Объект исследования: ДВС с искровым зажиганием.

Предмет исследования: процесс сгорания и его характеристики.

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

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

Научная новизна исследования

Выявлены возможности повышения эффективности газового ДВС.

Практическая значимость работы:

Явление электропроводности пламени может быть использовано в системах контроля и управления двигателем систем бортовой диагностики двигателя для повышения эффективности газового ДВС.

На защиту выносятся:

1. оценку наличия взаимосвязи электропроводности пламени с эффективностью рабочего процесса газового ДВС;
2. выявленные возможности повышения эффективности газового ДВС за счет контроля процесса сгорания по электропроводности пламени.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научных и обсуждались на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» и на студенческой конференции в 2018 и 2019 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 1 печатная работа.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 61 наименования. Работа изложена на 70 страницах машинописного текста, иллюстрированного 1 таблицей и 36 рисунками.

ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке наличия взаимосвязи электропроводности пламени с эффективностью рабочего процесса газового ДВС

Датчик ионизации является электрическим зондом для диагностики двигателей внутреннего сгорания. Процесс горения влияет на электрические свойства газа в цилиндре. Таким образом, сигнал датчика содержит обширную информацию об условиях в камере сгорания. Тщательная характеристика датчика позволяет использовать большую часть этой информации для управления обратной связью двигателя. В настоящей работе основное внимание уделяется выявлению основных механизмов функционирования ионизационного датчика и их взаимодействия. Для характеристики датчика использовались оптическая диагностика, анализ равновесия и элементарная модель. Было обнаружено, что контакт между фронтом пламени и катодом, а также состав смеси вдоль основного токового тракта регулирует сигнал датчика во время раннего сгорания. На основе этих данных была предложена зональная модель для датчика. Отображение распространения пламени показало, что турбулентность искажает форму первого токового пика, воздействуя на контакт между катодом и морщинистым фронтом пламени. Экспериментальные данные и анализ ионизационного равновесия в постпламенном газе показали, что следы щелочных металлов в атмосфере вносят основной вклад в термическую ионизацию при температурах, характерных для горения разбавленных смесей. Исследование взаимосвязи между давлением в цилиндре и сигналом датчика ионизации при различных условиях потока газа показало, что высокий поток газа нарушает эту зависимость. Изображения оксида азота и гидроксильных радикалов в постпламенном газе дают экспериментальные данные о том, что поток холодного, возможно несгоревшего газа из края камеры сгорания в область электродного зазора может объяснить это нарушение. Полученные знания, мы надеемся, помогут улучшить алгоритмы

получения информации от сигнала датчика и использовать эту информацию для мониторинга и оптимизации процесса горения.

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

Транспортный сектор будет иметь решающее значение для развития энергетики в Европе в течение следующих нескольких десятилетий [1]. Поскольку уровень жизни в странах третьего мира и пороговых странах развивается, следует ожидать и увеличения числа мотористов. Сегодня в транспортном секторе доминируют двигатели внутреннего сгорания. Хотя альтернативные решения, такие как транспортные средства, работающие на топливных элементах, привлекают все больше внимания и, безусловно, станут важными в будущем, традиционный двигатель внутреннего сгорания с высокой плотностью мощности и масштабируемостью будет по-прежнему доминировать во многих секторах. Потенциал этой технологии еще не исчерпан. В настоящее время разрабатываются более современные технологии двигателей. Электронное управление двигателем может повысить эффективность двигателей внутреннего сгорания. Для оперативного управления двигателем требуется непрерывная информация о процессе сгорания. Наиболее эффективным способом сбора этой информации является измерение непосредственно в камере сгорания. Для этой цели существуют различные варианты, например, датчики давления или волоконная оптика. Ионный датчик, состоящий из уже имеющейся свечи зажигания плюс дополнительная недорогая считывающая электроника, представляет собой экономически эффективную альтернативу этим решениям. Ионизация в пламени находилась в фокусе науки в 1950-х и 60-х годах, когда целью было оптимизировать магнитогидродинамические преобразователи энергии и понять образование ионизированных газов, например, ракетные выхлопы [2]. В последние годы исследователи также осознали значимость ионизации

для образования сажи в пламени [3]. Еще одно применение этого явления появилось в течение последнего десятилетия: диагностика горения с использованием электрических датчиков в двигателях внутреннего сгорания. В настоящее время датчик используется для обнаружения пропусков зажигания и детонации двигателя, и изучается его удобство в управлении коэффициентом эквивалентности и стабильностью горения. Выброс энергии во время горения приводит к образованию ионов и изменяет электрические свойства газа. Это дает возможность использовать проводимость газа в качестве диагностического параметра для сгорания. В двигателях с искровым зажиганием (SI) основная цель свечи зажигания - инициировать процесс горения. Однако свеча зажигания также может действовать как датчик. Это достигается путем приложения напряжения через электродный зазор свечи зажигания после зажигания смеси. Это напряжение низкое по сравнению с напряжением, используемым для инициирующего пламя разряда, но будет вызывать детектируемый ток. Поскольку на проводимость газа сильно влияет процесс горения, ток можно использовать для мониторинга этого процесса. Для получения этой функциональности дополнительное оборудование не требуется в камере сгорания. Этот тип датчика, называемый ионным зондом или ионизационным датчиком, уже нашел широкое применение в диагностике горения в двигателях внутреннего сгорания, что помогает оптимизировать процесс сгорания и, таким образом, минимизировать расход топлива и выбросы выхлопных газов [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. До сих пор многое было достигнуто с помощью сложного анализа данных, например, путем сопоставления некоторых особенностей кривых тока с другими данными двигателя, такими как давление или состав смеси.

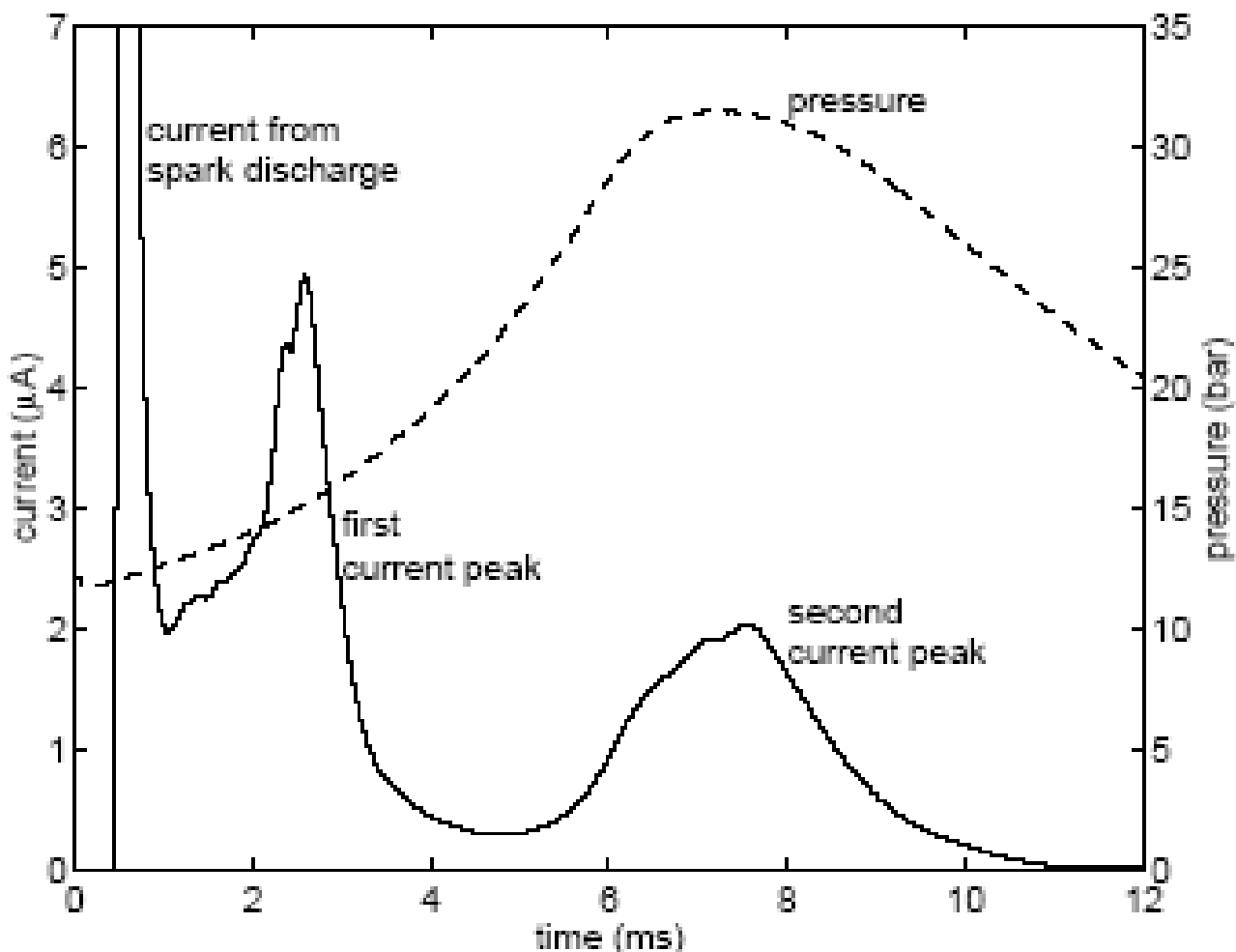


Рисунок 1.1 – Типичный ток датчика ионизации в свече зажигания и соответствующее индикаторное давление, измеренное в двигателе.

Типичный пример тока, измеренного в двигателе, представлен на рисунке 1.1 вместе с трассой давления, показывающей энерговыделение при сгорании. В текущем состоянии можно заметить три отличных пика. Самый первый пик реплицирует искровой разряд, инициирующий пламя, и здесь не рассматривается. В оставшемся сигнале можно выделить две части. Первое, как правило, связано с контактом между электродами и малым ядром пламени. В этом случае химионизация считается доминирующим механизмом для создания проводящего канала между электродами [2]. Второй, который совпадает с пиком давления, обычно понимается как результат термической ионизации из-за высокой температуры в сожженных газах [17, 19], хотя другие наблюдения указывают на связь между контактом пламени электрода и стен камеры сгорания и этого сигнала [19]. Как правило,

ионный чувствительный ток сильно варьируется в зависимости от условий работы двигателя, но два пика, описанные выше, могут быть почти всегда идентифицированы. Инженеры пытаются использовать ионизационный датчик для диагностических целей в двигателях внутреннего сгорания. Цель состоит в том, чтобы получить информацию от сгорания, подобную той, которая была собрана датчиками давления, но более экономически эффективна, и использовать эту информацию для контроля обратной связи параметров, регулирующих работу двигателя. Осечка значительно увеличивает выбросы углеводородов, снижает общую эффективность и приводит к сильным колебаниям частоты вращения двигателя. Ли и Пико [10] использовали интегральный сигнал тока для обнаружения пропуска зажигания, в то время как Auzinsetal. [11] выбрал низкочастотный отфильтрованный сигнал. VanDyneetal. [17] реализовано обнаружение пропуска зажигания путем отображения интегрированного среднего эффективного давления (IMEP) и сигнала интегрированного датчика ионизации, но возникли проблемы при работе с низкой нагрузкой из-за слабого сигнала датчика. Ohashietal. [14] определил свойство, называемое «условием горения», из текущего сигнала и оценил его, чтобы обнаружить пропуски зажигания. Стук - это неконтролируемое горение, вызванное нагревом несгоревших газов из-за одновременного сжатия движущимся фронтом пламени и поршнем, что приводит к волнам давления в камере сгорания. Они, в свою очередь, могут вызывать соответствующие изменения локальной температуры и, таким образом, влиять на ионизацию локально. Этот эффект позволяет обнаруживать детонацию с помощью ионизационного зондирования, как показано в нескольких публикациях [11, 14]. Соотношение воздух-топливо представляет интерес из-за его важности для эффективности трехкомпонентного катализатора. Клементс и Сми [18] изучили влияние соотношения воздух-топливо на ток на отрицательный зонд в двигателе и обнаружили, что он слегка падает на богатой стороне. Hellringetal. [13] использовали нейронные сети для оценки значений лямбда.

Klovmarketal. [8] выполнил гауссовскую параметризацию сигнала и использовал полученные параметры вместе с углом зажигания и информацией о скорости вращения двигателя для оценки коэффициента воздушного топлива с точностью до 0,1% при среднеквадратичной ошибке. В сочетании с внешним кислородным датчиком в выхлопной трубе этот метод может использоваться для балансировки цилиндров коэффициента эквивалентности. Пиковая информация о давлении необходима для контроля за искровым зажиганием, чтобы оптимизировать эффективность двигателя. Исследованы перспективы оценки положения пикового давления по токовому сигналу [7, 9, 12]. HellringandHolmberg [9] сравнили несколько алгоритмов и обнаружили, что алгоритм нахождения пика, приведенный в ссылке [9], «превосходит своих конкурентов», представлен в ссылках [18] и [19].

Нестабильное сжигание является общей проблемой при использовании сильно разбавленных смесей. Андерссон и Эрикссон [6] исследовали коэффициенты изменения интеграла тока датчика и интегрированного среднего эффективного давления (IMEP) в прямом инжектированном двигателе и пришли к выводу, что эти два свойства тесно связаны. Byttneretal. [4] исследовал изменение ИМЕП и сигнала ионного тока в двигателе, как в лабораторных условиях, так и на дороге. Они обнаружили, что корреляции между этими двумя свойствами слабее при реальных условиях движения и что корреляции существуют только для стехиометрических или более компактных соотношений воздух-топливо. Кроме того, корреляция исчезает при высоких нагрузках: в текущем сигнале сохраняется значительное изменение, в то время как относительное изменение ИМЕП почти исчезает. Peronetetal. [11] обобщил преимущества и недостатки ионизационного датчика, в частности, в отношении датчиков давления, и пришел к выводу, что он более полезен для качественной диагностики. При использовании для количественной диагностики рекомендуется использовать относительные меры, такие как коэффициент

вариации вместо абсолютных. По сравнению с большим объемом работы, связанной с применением, число фундаментальных исследований ионизационного датчика выглядит довольно небольшим. Однако фундаментальная работа над таким датчиком является решающей для того, чтобы повысить наше понимание управляющих процессов и их взаимодействия. Знание об этом облегчает интерпретацию сигнала и помогает в разработке и оптимизации алгоритмов управления двигателем. Рейнманн [12] представил модели как для первого, так и для второго пиков в токе датчика. Reinmannetal. [19] установлено, что концентрация иона H_3O^+ пропорциональна квадратному корню из отношения эквивалентности. Предполагается, что этот ион является одним из наиболее распространенных в пламени углеводородов [13, 14]. Saitzkoffetal. [17] выполнил анализ ионизационного равновесия сгоревшего газа для расчета тока при основном сгорании. Несмотря на упрощающие предположения о электрическом поле и транспортных свойствах газа, а также пренебрежение электроотрицательными видами, было получено разумное качественное согласие с экспериментальными данными. Несколько лет назад Вильстерманн [15] представил результаты комплексных исследований ионизационного датчика. Объединив накопленные знания об образовании и поведении ионов в пламени с электродинамическими расчетами, химической кинетикой и симуляцией цикла двигателя, Уилстерманн разработал мощный инструмент, способный имитировать токи датчиков в произвольной геометрии двигателя. В модель были включены как химиоионизация, так и термическая ионизация, а также рекомбинация и диффузия. Согласование между имитируемыми и измеренными токами удивительно. К сожалению, редкая документация по алгоритмам и данным химической кинетики, используемая для получения, в частности, степени химической ионизации, затрудняет оценку результатов и использование этой работы. Вильстерманн также провел обширные экспериментальные исследования в двигателях внутреннего сгорания. В дополнение к параметрическим исследованиям

были проведены исследования роли геометрии свечи зажигания. Было обнаружено, что размер центрального электрода (анода) оказывает влияние на ток нелинейным образом. Это объясняет Вильстерманн с измененной площадью контакта и однородностью однородного электрического поля. Еще один интересный вывод заключался в том, что удаление бокового электрода (катода) не влияет на ток. Это, по-видимому, противоречит выводам Yoshiyamaetal. [16], который проводил эксперименты как в бомбе с постоянным объемом, так и в двигателе, и наблюдал, что изоляционные части катода уменьшают ток и что соединительный катод, и стенка цилиндра приводят к более выраженному току при основном сгорании, тогда как второй пик исчез, когда они прервали эту связь. В последнее время Naoumovetal. [15] введена новая модель, позволяющая моделировать горения и ионизационный ток. Naoumovetal. применяют неравновесные методы для обоих пиков тока датчика, но без каких-либо очевидных улучшений по сравнению с имитациями Wilstermann или Reinmann. Использование неравновесного подхода для второго пика может быть не ошибочным, но представляется излишним при рассмотрении того, насколько быстро ионизация следует за изменениями температуры, например. в случае стука. Тезис, который недавно представил Андерссон [16], касается моделирования второго токового пика. Андерссон использовал модель, разработанную Saitzkoffetal. [17], и добавил улучшенные подмодели для давления в цилиндре, для образования оксида азота и для температуры сгоревшего газа, близкого к электродному зазору.

1.2 Процессы ионизации при сгорании

1.2.1 Общие положения

Чтобы понять электрические свойства пламени, важно получить информацию о концентрациях различных видов заряженных частиц, присутствующих во время горения. Возможными носителями являются

электроны, положительные и отрицательные ионы. Как видно из раздела 1.2, их способность переносить ток сильно различается. Цель этого раздела - предоставить справочную информацию о различных физических и химических процессах, связанных с образованием ионов. Говоря об ионах, нужно различать положительные ионы, образованные отрывом электронов, и отрицательные ионы, образованные электронным присоединением. В дальнейшем ионизация относится к образованию положительных ионов. Как правило, отрыв электрона требует энергии. Эта энергия может быть обеспечена различными процессами. Например, ионизация атомов или молекул осуществляется электромагнитным излучением или столкновением с высокоэнергетическими частицами в фазе предварительного пробоя искрового разряда. Однако в пламени доминируют другие процессы. Положительные ионы могут образовываться в результате химической реакции, называемой химио-ионизацией. С другой стороны, если температура в газе становится достаточно высокой, кинетическая энергия частиц может быть достаточной для обеспечения необходимого количества энергии во время столкновений. Этот процесс, следовательно, называется термической ионизацией. Эти два процесса рассматриваются как наиболее важные способы формирования положительных ионов в пламени и будут предметом следующих двух разделов. Пламя обеспечивает идеальные условия для образования отрицательных ионов из-за обилия электроотрицательных видов. Электронное присоединение потребляет свободные электроны и уменьшает проводимость газа. Привязка электрона к электроотрицательным видам обсуждается в разделе 1.1.4. Тот факт, что пламя проявляет электропроводность, известен с XVII века [17]. Первые систематические исследования этого вопроса датируются началом двадцатого века, и в 1950-х и 1960-х годах он приобрел больше интереса, когда была тщательно изучена возможность генерации электрической энергии с помощью магнитогидродинамических (МГД) преобразователей. В течение последнего десятилетия вопрос об образовании ионов в пламени

снова перешел в фокус исследований сжигания, поскольку роль ионов полиароматических углеводородов (ПАУ) в образовании сажи стала более ясной и из-за попыток разработать зонды для диагностики горения основанный на электрических свойствах газа при горении. Недавно Фиалков [18] дал всесторонний обзор по вопросу о пламени ионов.

1.2.2. Химио-ионизация

Химические реакции между стабильными видами требуют активации энергии активации E_a . Часто эта энергия обеспечивается в виде тепловой энергии. Реакции, которые потенциально могут привести к ионизации одного продукта, должны быть экзоэнергетическими, то есть. Они должны выделять энергию. Поскольку энергетический баланс в химической реакции обычно выражается через энтальпию реакции, которая представляет собой разность энтальпий образования продуктов и реагентов, это соответствует <0 . Реакция с участием двух реагентов (А и В) и два произведения (С и D), для которых это отношение имеет место, также могут быть записаны как Следовательно, ионизация произведения D возможна, если сумма энергии активации и энтальпии реакции превышает потенциал ионизации вида D. Начиная из этого условия должно быть возможно рассчитать концентрацию ионов от концентрации нейтральных частиц. Однако это оказывается предприятием, поскольку параметры реакции, в частности энергия активации, недостаточно хорошо известны для реакций. Более надежные результаты были получены экспериментально с помощью масс-спектропии [13, 14, 19]. Кроме того, обширные исследования с использованием ленгмюровских зондов были проведены Calcote [13, 14, 15, 16, 17, 18], а циклотронный резонанс использовался Булевичем и Падли [19]. Большинство измерений было выполнено при низких давлениях, чтобы увеличить пространственное разрешение при взятии проб из зоны реакции. Из этих измерений, в сочетании с соображениями о химической кинетике, мы знаем, что наиболее

распространенными ионами в реакционной зоне пламени углеводородов являются CHO^+ , скорее всего, образующиеся в результате реакции и H_3O^+ , который образуется из CHO^+ реакцией переноса протонов А третий ион, часто наблюдаемый в пламени с углеводородным воздухом, представляет собой C_3H^+ , который, скорее всего, образуется в результате реакции [18]. Эти три реакции вместе с реакцией рекомбинации были использованы Рейнманом и др. [19] в модели для описания тока через зазор свечи зажигания во время раннего сгорания. Химио-ионизация также может приводить к образованию отрицательных ионов. Однако никакой реакции на возможную схему еще не выявлено [18].

1.2.3. Термическая ионизация.

В постпламенной зоне высокая температура подразумевает высокую кинетическую энергию частиц газа. Столкновения между этими частицами могут привести к образованию пар электронов и положительных ионов. Обратный процесс, рекомбинация, уменьшает концентрации электронов и ионов. Написав ионизацию и рекомбинацию для вида А в качестве реакции, можно получить выражение для равновесия. Поскольку все виды находятся в газовой фазе, парциальное давление является подходящей переменной для описания равновесия. Скорость прямой реакции (скорость ионизации) пропорциональна парциальному давлению видов А, p_A , тогда как обратная скорость реакции (скорость рекомбинации) пропорциональна продукту. Выраженные с точки зрения скорости потребления вида, эти отношения можно записать так же, как и $k_f(T)$, а $k_b(T)$ - зависящие от температуры константы скорости реакции. В случае равновесия оба уровня потребления равны. Это дает выражение для равновесных концентраций участвующих видов с зависящей от температуры константой равновесия $K(T)$. Традиционным способом расчета ионизационных равновесий является использование уравнения Саха. Эта полезная связь была первоначально

получена для идеализированной системы невзаимодействующих атомов водорода, протонов и электронов и использовалась в астрофизике. Тем не менее, он часто и успешно применяется к более сложным системам [17, 18]. Один из способов получения уравнения Саха состоит в том, что свободная энергия принимает минимальное значение в термодинамической системе с постоянным объемом и температурой в равновесии. Выражение связывает статистическую величину статистической функции Z , свободной от энергии $F(T; V) = U - TS$, термодинамического потенциала. В [12] дается пошаговый вывод статистической суммы. Минимизация свободной энергии показана в [13]. Результатом этой минимизации является искомая зависимость [12], которая связывает электронную плотность в газе атомов водорода с плотностью газа n и температурой. Переменная также называется тепловой длиной волны электронов и определяется в уравнении [13]. При применении этого соотношения к другим системам плотность газа n должна быть заменена плотностью вида A , являющегося доминирующим донором электронов. Так Сайцкофф и др. [17, 18], Вильстерманн [15] и Андерссон [16] адаптировали уравнение. Более гибкий метод выполнения расчетов ионизационного равновесия, особенно при участии нескольких видов, основывается на системе уравнений равновесия и уравнениях для сохранения элементов. На рисунке 1.2 показана символическая ионная система измерения. Сжигание генерирует свободный заряд, e^- . Внешняя измерительная схема обеспечивает измерительное напряжение от конденсатора. Ток I протекает по цепи, и текущее эквивалентное напряжение U_{Ion} измеряется через резистор R .

1.2.4 Электронное присоединение

Тенденция к нейтральной частице для захвата электрона и образования отрицательного иона описывается его электроотрицательностью. При

сжигании присутствуют различные электроотрицательные виды, наиболее важным из которых является молекулярный кислород из-за его обилия.

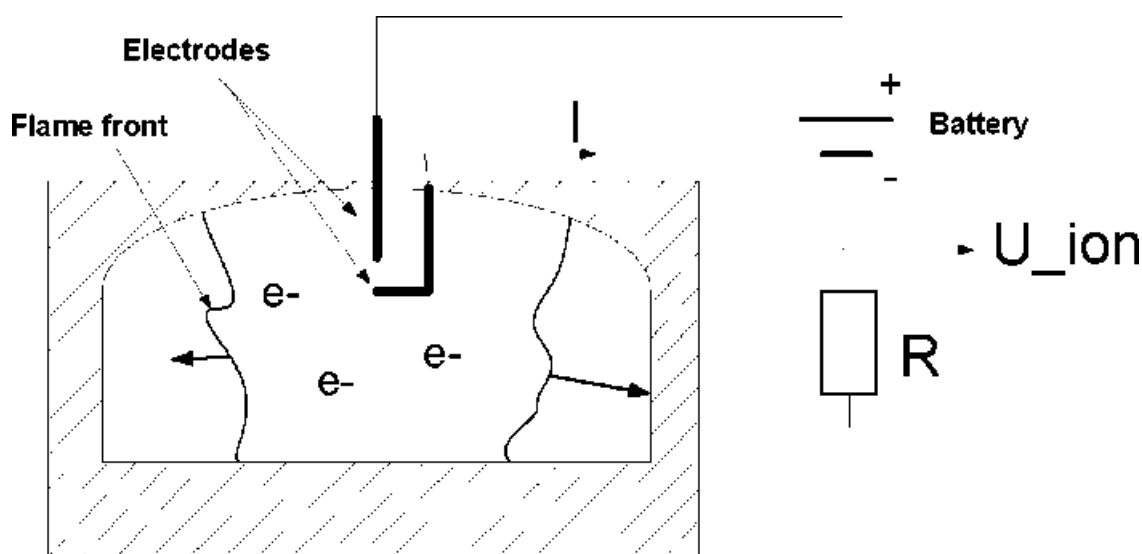


Рисунок 1.2 –Измерительная схема обеспечивающая измерение ионного тока

ОН-радикал, присутствующий на фронте пламени, может даже быть более важным из-за его высокой сродства к электрону. Можно выделить три возможных типа процессов, образующих отрицательные ионы [18]. Во-первых, существует возможность химиоионизации, о которой говорилось в разделе 1.2.2. Во-вторых, можно рассмотреть диссоциативную привязанность, то есть реакцию типа. В-третьих, наиболее заметным типом является привязка трех тел, где для сохранения энергии и импульса требуется вид М. Примером такого процесса являются Hayhurst и Kittelson [10], дающие скорости реакции для реакции (2.4), позволяющие рассчитывать концентрацию отрицательных ионов, обеспечивающую концентрации для электронов, кислорода и вида М. Предполагая условия и видовые концентрации, характерные для несгоревшего края фронта пламени, Фиалков [18] пришел к выводу, что большинство электронов прикреплены к кислороду менее чем за 30 мс. Экспериментальные результаты, полученные Goodingsetal. [11] показывают, что равновесная концентрация O-2 может быть в 500 раз больше, чем концентрация электронов при 600 К в пламени, богатом топливом, и даже больше в обедненном пламени. Очевидно, что в

средах, где присутствует кислород, большая часть электронов будет связана этим видом. Присоединение электрона к электроотрицательной частице в постпламенной зоне можно рассматривать как ионизационное равновесие. Написание равновесия присоединения электрона, как подчеркивает сходство с уравнением (2.2). Электронное сродство электроотрицательных видов заменяет потенциал ионизации в уравнении (A.27). Таким образом, равновесие между электронами и электроотрицательными видами, с одной стороны, и отрицательными ионами, с другой стороны, также можно описать с использованием равновесных констант $K(T)$.

1.3 Перспективы применения явления электропроводности пламени в ДВС

Обзор был посвящен идентификации физических механизмов функционирования ионизационного датчика и их взаимодействия. Цель заключалась в том, чтобы увеличить наше понимание роли этих основных механизмов, чтобы облегчить интерпретацию сигнала датчика в приложениях. Эксперименты и симуляции, представленные в этом тезисе, были разработаны для ответа на вопросы общим образом с намерением разрешить передачу выводов в другие, зачастую более сложные среды. В дополнение к исследованиям, касающимся ионизационного датчика, в двигателе HCCI проводилась различная оптическая диагностика, а энергетическое осаждение искровых разрядов изучалось с помощью калориметрии. Все эти исследования имеют общую цель - совершенствование технологии двигателей. Исследования ионизационного датчика включают в себя одновременное измерение тока датчика и локального коэффициента эквивалентности с двумерной лазерно-индуцированной флуоресценцией, экспериментальное исследование роли контакта между пламенем и электродом для формы раннего тока, структура моделирования, которая позволяет включить эффекты электрода, анализ

ионизационного равновесия в постпламенной зоне, исследование влияния потока газа на ток датчика и измерения тока, сопровождаемые одновременной визуализацией оксида азота и гидроксильные распределения как в покое, так и в турбулентном горении. Двумерная индуцированная лазером люминесценция обеспечивала информацию о локальном отношении эквивалентности близко к зазору электрода непосредственно перед зажиганием. Обнаружена сильная корреляция между интегралами как при текущих пиках, так и в отношении эквивалентности смеси во время измерений в покоящихся однородных смесях. Турбулентные гетерогенные смеси значительно ухудшили корреляцию. Кроме того, корреляция, по-видимому, ограничивается областью, которая соединяет электроды, а не, как ожидалось, с зазором электрода, что указывает на то, что ток достигает первого максимума при контакте с более крупными областями электродов. Для реализации этой идеи была проведена серия опытов. Основные выводы здесь заключались в том, что контакт между пламенем и катодом необходим для тока во время раннего сгорания и что заряды транспортируются главным образом вдоль оболочки ядра пламени. Была разработана модель, которая подчеркивает эти процессы. Было высказано предположение, что механизмы, подобные тем, которые происходят в тлеющих разрядах, также контролируют излучение электронов с катода ионизационного датчика и действуют как узкое место для сигнала датчика ионизации. Ток при основном сгорании вызван термической ионизацией. Всестороннее исследование ионизационного равновесия в послепламенных газах включало также важные электроотрицательные виды и микроэлементы, присутствующие в атмосфере. Было показано, что щелочных следов, присутствующих в воздухе, достаточно для преобладания сигнала датчика ионизации в большинстве условий. Только при довольно высоких температурах важную роль может сыграть ранее предполагаемый основной донор электронов, оксид азота. Применение ионизационного датчика в двигателях предполагает наличие турбулентных условий. Поэтому знание о

том, как поток газа влияет на ток датчика, должно поэтому считаться полезным. Пламенная визуализация на ранней стадии горения дала объяснения изменения первого пика тока от цикла к циклу. Было показано, что изменяющийся контакт между пламенем и катодом является причиной наблюдаемых в форме отклонений. Что касается второго пика, измерялось влияние потока газа на корреляцию между давлением и током. Высокие скорости потока вблизи свечи зажигания нарушали корреляцию между током и пиковым положением давления. Двумерное изображение оксида азота обеспечило еще одно средство для исследования важности этого потенциального донора электронов для сигнала датчика ионизации. Слабая корреляция между локальной концентрацией NO и анализируемым током подтвердила результаты анализа равновесия. Было обнаружено, что концентрация оксида азота и гидроксильных радикалов меньше вблизи электродов в покоящихся смесях. Причиной этого может быть охлаждение электродами. В турбулентных смесях наблюдался перенос газа с различными концентрациями NO и OH в зазор между электродами. Связь между текущей и средней температурой газа отклонялась от температуры, наблюдаемой в покоящихся смесях. Поведение тока влияет на локальную температуру, а не на среднюю температуру, определяемую давлением. Результаты позволяют составить подробную картину датчика. Ранний сигнал датчика вызван переносом зарядов вдоль реакционной зоны. Области с более богатой смесью обладают более высокой проводимостью, вызванной химио-ионизацией. Однако фактически наблюдаемый ток контролируется контактом между проводящей зоной и катодом. Таким образом, он режет условия на фронте пламени в момент достаточного контакта с катодом. Поэтому разница в распределении топлива может приводить к изменениям первого пика тока, хотя средний состав смеси остается неизменным. Наличие газового потока приводит к случайному контакту между пламенем и электродами, вызванными деформацией и движением ядра пламени. Это вводит дополнительные вариации первого пика как по форме, так и по величине.

Стены камеры сгорания - головки цилиндров, головки поршня и стенки цилиндра - обычно находятся на том же потенциале, что и катод. Когда пламя достигает стены, и контакт с анодом все еще обеспечивается, это может позволить больше тока через фронт пламени. В зависимости от формы камеры сгорания — это может привести или не привести к дополнительному отдельному пику, который в конечном итоге совпадает со вторым пиком. Термическая ионизация увеличивает проводимость постпламенных газов и приводит к пику тока, который обычно совпадает с максимумом давления. Величина этого второго пика контролируется главным образом температурой газа в зазоре электрода. Таким образом, все процессы, которые влияют на температуру газа в зазоре, также влияют на форму и величину второго токового пика. Кроме того, ток зависит от наличия доноров электронов и акцепторов. Фоновая концентрация доноров электронов, а именно щелочных металлов, присутствует в атмосфере, и она доминирует над сигналом датчика при относительно низких температурах, например, в условиях разбавленного двигателя или в случае позднего зажигания. Поток газа в цилиндре может транспортировать газ с разной температурой или концентрацией донора электронов в зазор, что приведет к отклонению от ожидаемого соотношения между током и давлением. В приведенной выше комплексной картине несколько основополагающих выводов основаны на косвенных рассуждениях и требуют дальнейших исследований. В частности, знание о температуре местного газа оказалось ценным из-за важной роли температуры для ионизационного равновесия. Для спокойного сгорания правильная информация о температуре может быть получена при моделировании с использованием нескольких зон [15]. Поскольку тепловые потери на электродах важны, они должны быть включены в многозонную модель. Информация о температуре также может быть получена с помощью спектроскопии, например, путем зондирования популяции разных уровней молекулы или атома [13]. Этот метод также подходит для турбулентных смесей. Из разработанных экспериментов была

разработана модульная система моделирования. Чтобы эта модель использовалась не только для качественной интерпретации экспериментальных результатов, она должна быть оснащена правильными модулями для важных процессов. Учитывая вывод о том, что электронная эмиссия с катода является предельным процессом для тока, подмодель для этого механизма будет очень приветствуем. Подмодель для процесса химиоионизации должна включать электроотрицательные виды, чтобы предсказать правильный ток также для постных смесей. Кроме того, информация о температуре также важна для этой модели и должна быть реализована с использованием многозонной модели.

На рисунке 1.2 показана типичная картина появления ионного тока на датчике расположенном в свече зажигания в двигателе с индуктивной системой зажигания. Фаза зажигания начинается с подачи тока разряда на свечу зажигания создания электрического пробоя между электродами свечи и заканчивается образованием устойчивого, способного к само распространению фронта пламени. Фаза фронта пламени часто упоминается как первый пик или пик пламени, но это уже начало второй фазы сгорания так как мы фиксируем уже сформировавшийся фронт пламени. Фаза после пламени вызывается эффектами термоионизации и была названа тепловым пиком или пиком после пламени.

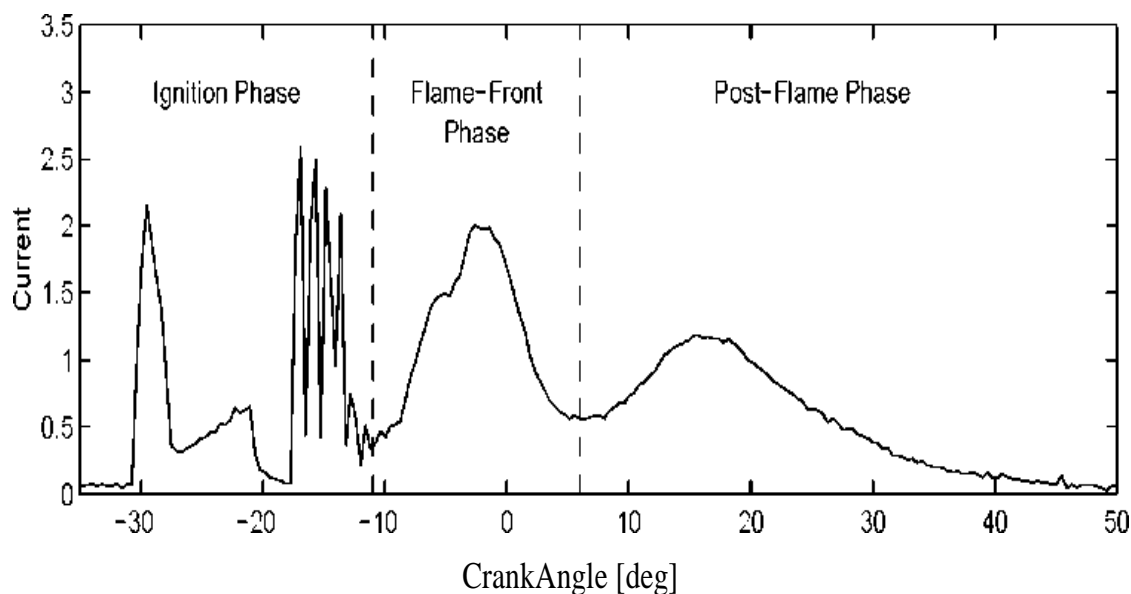


Рисунок 1.2 -Типичная картина появления ионного тока на датчике расположенном в свече зажигания в двигателе с индуктивной системой зажигания

Как правило, современные измерительные системы ионного тока используют потенциал положительного центрального электрода. Электронный ток на положительном электроде доминирует над полным током из-за более низкой массы и более высокой температуры электронов по сравнению с ионами. Для проверки этой гипотезы проводились исследования на бомбе (рисунок 1,4) [50-72]. У бомбы сгорания есть искровой промежуток между двумя электродами, которые изолированы, за исключением верхней части, где искры испускается. Стена бомбы может быть электрически изолирована или подключена к одному из электродов. Когда смесь зажигалась проводились измерения ионизационного тока между электродами для различных положений электрода от стенки камеры. Высокоскоростная камера через кварцевое окно следила за пламенем и снимки синхронизировались с измеренным током. Результирующий ток показывает в некоторых случаях два характерных пика (рисунок 1.5).

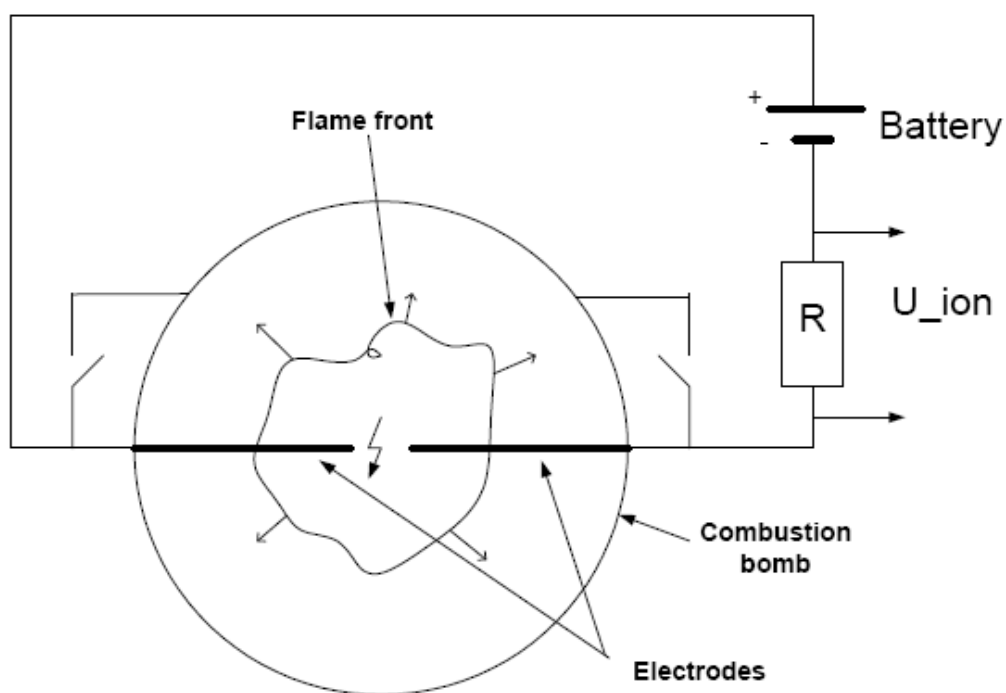


Рисунок 1.4–Исследования электропроводности на бомбе

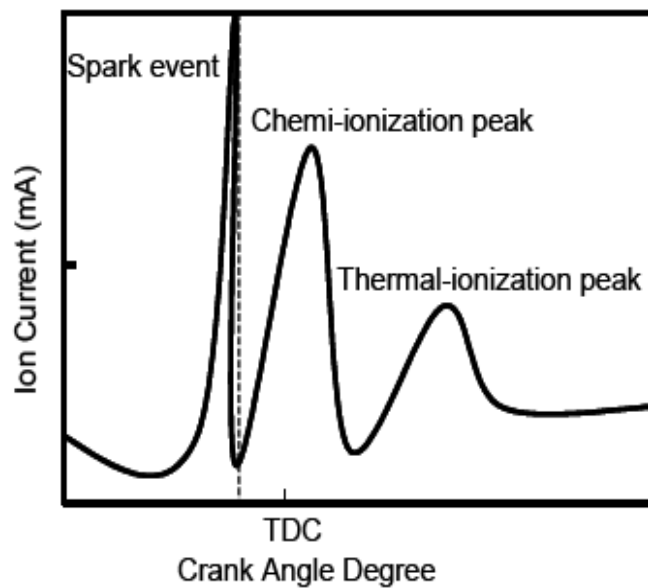


Рисунок 1.5 – Вид сигнала ионного тока при исследовании электропроводности на бомбе

На основании множества экспериментальных и теоретических исследований были разработаны схемы для исследования и мониторинга процесса сгорания по электропроводности в пламени. В работе [10] схема мониторинга ионного тока включает свечу зажигания, измерительный резистор и усилитель (рисунок 1.6).

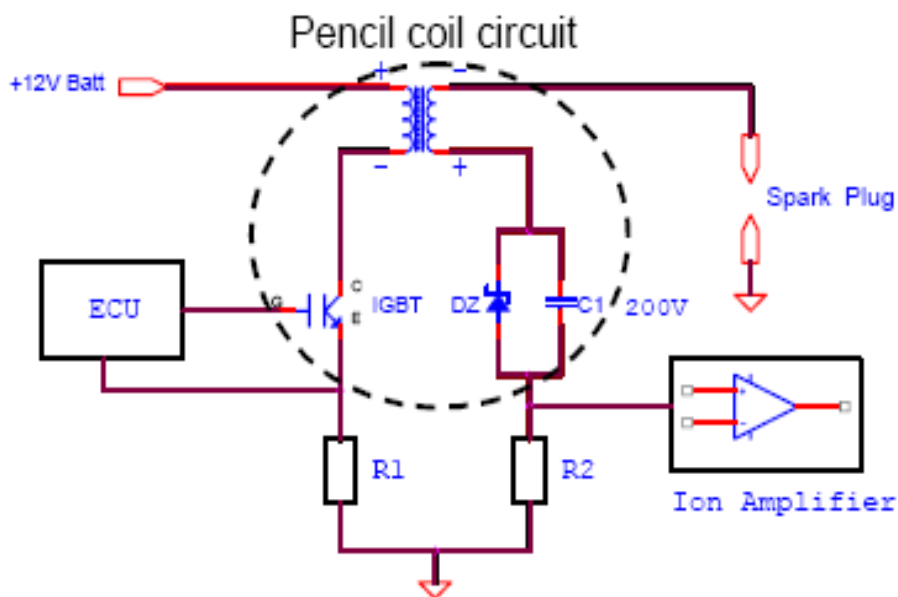


Рисунок 1.6 - Схема мониторинга ионного тока

В публикации [13] показана только принципиальная схема измерений ионного тока в цепи свечи зажигания (рисунок 1.7)

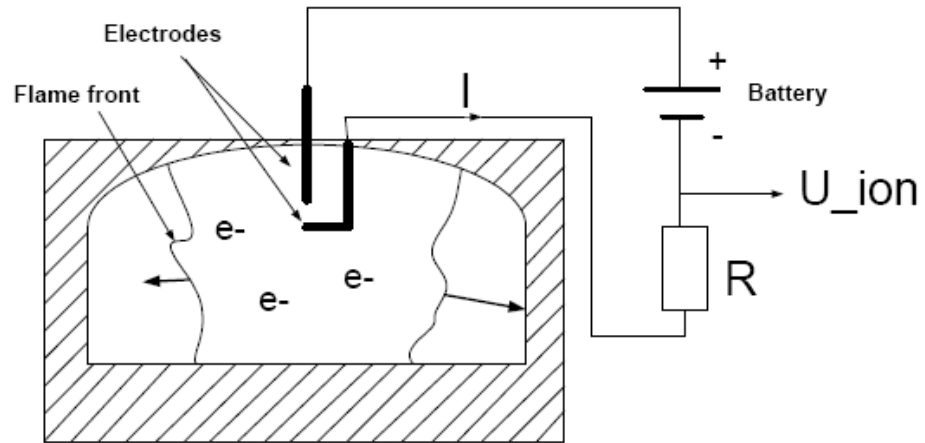


Рисунок 1.7 - Принципиальная схема измерений ионного тока в цепи свечи зажигания

В статье [13] также используется свеча зажигания в качестве ионизационного зонда. В данной схеме применены две электрические цепи, питающие свечу зажигания с разными источниками питания (рисунки 1.8, 1.9 и 1.10). Одна цепь используется для создания искрового разряда, а вторая для возбуждения ионного тока в искровом промежутке цепи.

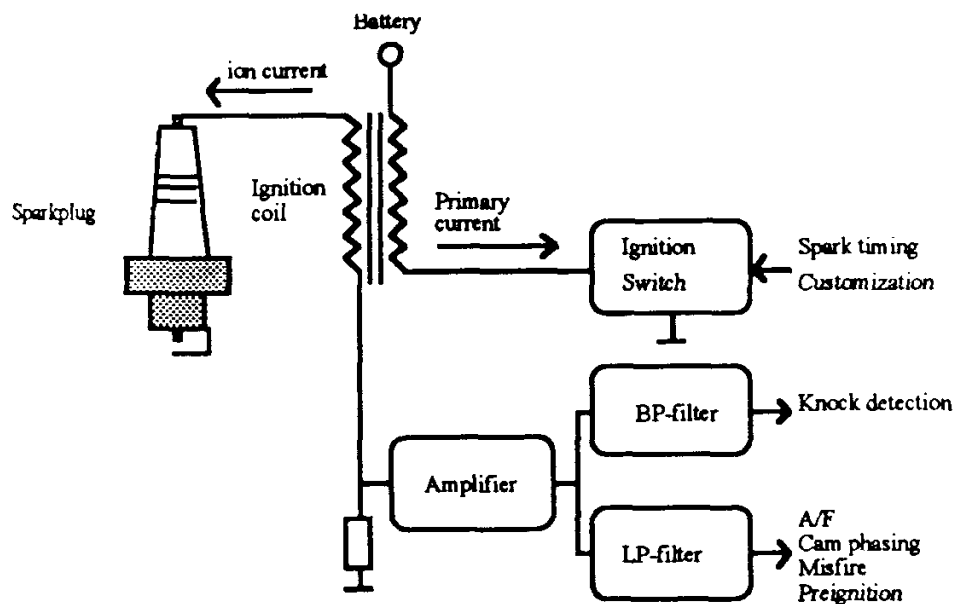


Рисунок 1.8 - Схема мониторинга ионного тока

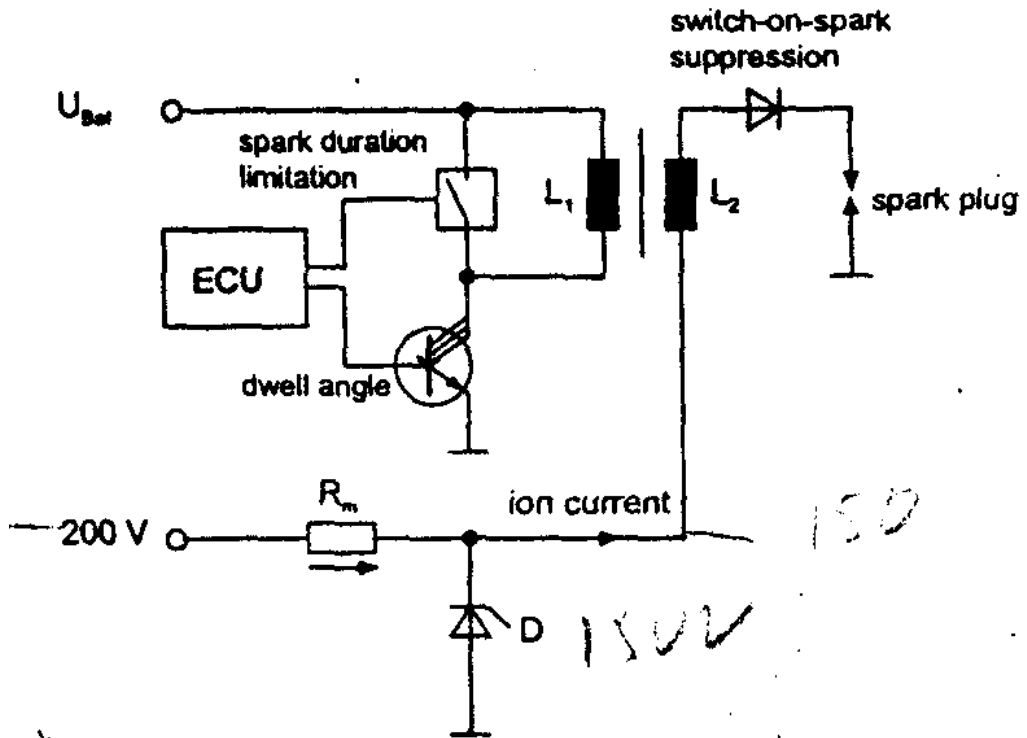


Рисунок 1.9 - Схема индуктивной системы зажигания с использованием свечи зажигания в качестве датчика ионизации

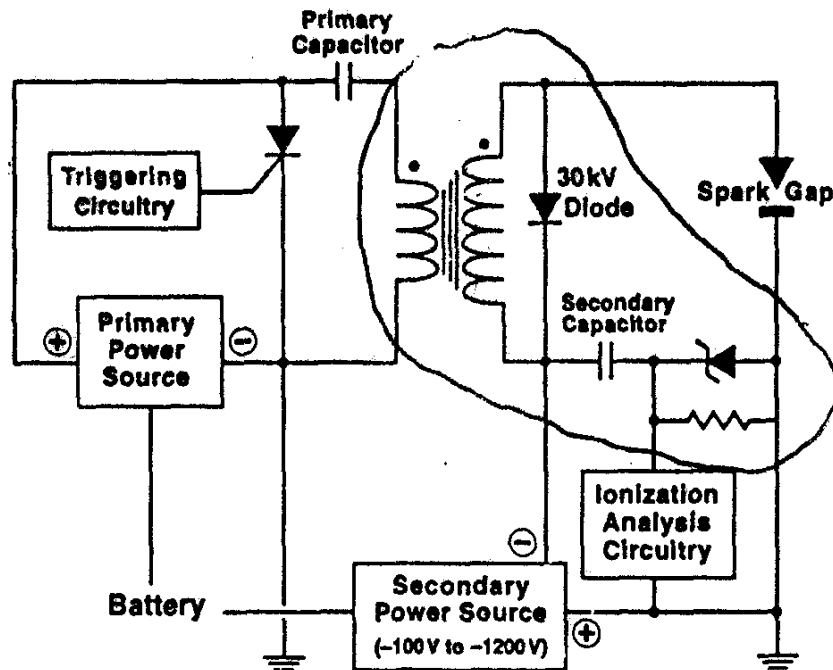


Рисунок 1.10 - Схема контура цепи зажигания с двумя источниками питания

В их работе [14] использована система зажигания переменного тока. Использование переменного тока в данном случае основано на специфических свойствах электрического поля свечей зажигания, существующей в точке поверхности, характеризующейся экстремальной не гомогенностью электрического поля, обусловленной малым размером центрального электрода. Это причины диодной характеристики ионного сигнала: очень слабый сигнал для отрицательного напряжения и высокий сигнал для положительного напряжения соответственно. Использование переменного напряжения позволяет сделать очень простую, устойчивую и надежную схему обнаружения ионного тока (рисунок 1.11). Однако для получения адекватной информации сигнал со свечи зажигания должен быть подвергнут достаточно сложной обработке.

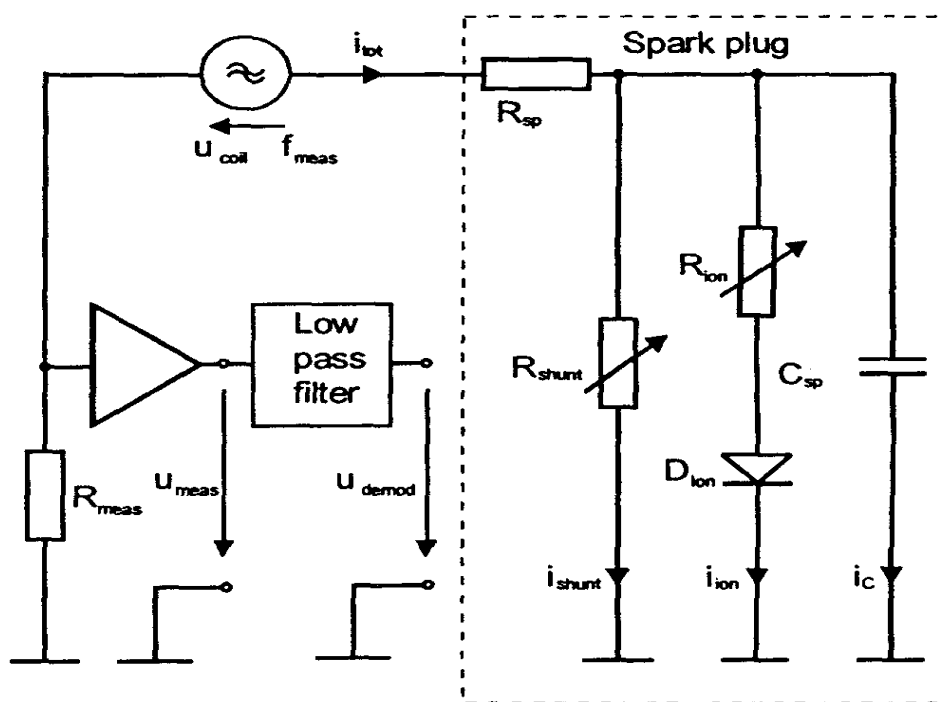


Рисунок 1.11 - Схема обнаружения ионного тока при использовании переменного напряжения

1.4 Выводы по разделу «Изучение литературы для выявления и оценке наличия взаимосвязи электропроводности пламени с эффективностью рабочего процесса газового ДВС»

Таким образом, в большом количестве исследований, проводимых различными организациями независимо друг от друга, экспериментально выявлены взаимосвязи сигнала ионного тока со следующими параметрами сгорания: пропуском зажигания, углом опережения зажигания, детонационное и аномальное сгорание, местоположение пика давления на индикаторной диаграмме, коэффициентом избытка воздуха.

Однако в публикациях не приводятся подробно результаты экспериментов и не описываются методики интерпретации сигнала ионного тока, которые могут быть использованы в моделировании процессов сгорания и в системах управления двигателем.

В связи с вышесказанным, представляется необходимым проведение собственных экспериментов. По результатам экспериментальных работ разрабатываются методики анализа сигналов ионного тока. При этом могут быть разработаны различные методики, как для исследований процесса сгорания, так и для использования в системах управления двигателем.

ГЛАВА 2 Описание экспериментального оборудования и план проведения экспериментальных исследований

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

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

2.1 Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились на одноцилиндровой установке УИТ-85 (рисунок 2.1) и на двигателе ВАЗ-2111 (рисунок 2.2). Основная информация о геометрических параметрах двигателя УИТ-85 приведена в таблице 2.1. Основная информация о геометрических параметрах двигателя ВАЗ-2111 приведены в таблице 2.2.

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



Рисунок 2.1 – Внешний вид установки УИТ-85 и схема расположения датчиков в камере сгорания

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

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

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

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

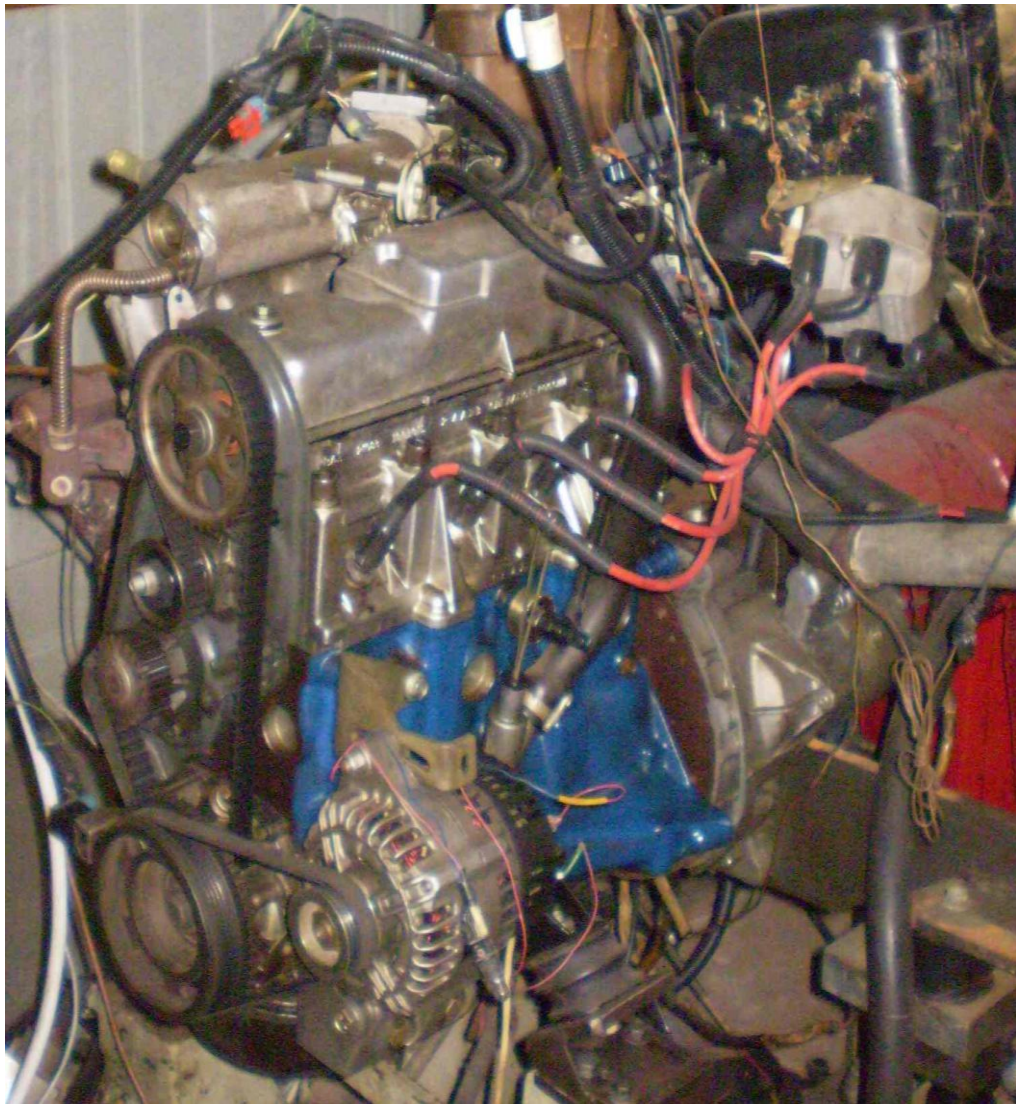


Рисунок 2.2 – Внешний вид двигателя ВАЗ-2111

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

водорода и бензин с добавками водорода [22, 23, 24]. А в двигателе ВАЗ-2111 применяли только CNG и бензин [25].

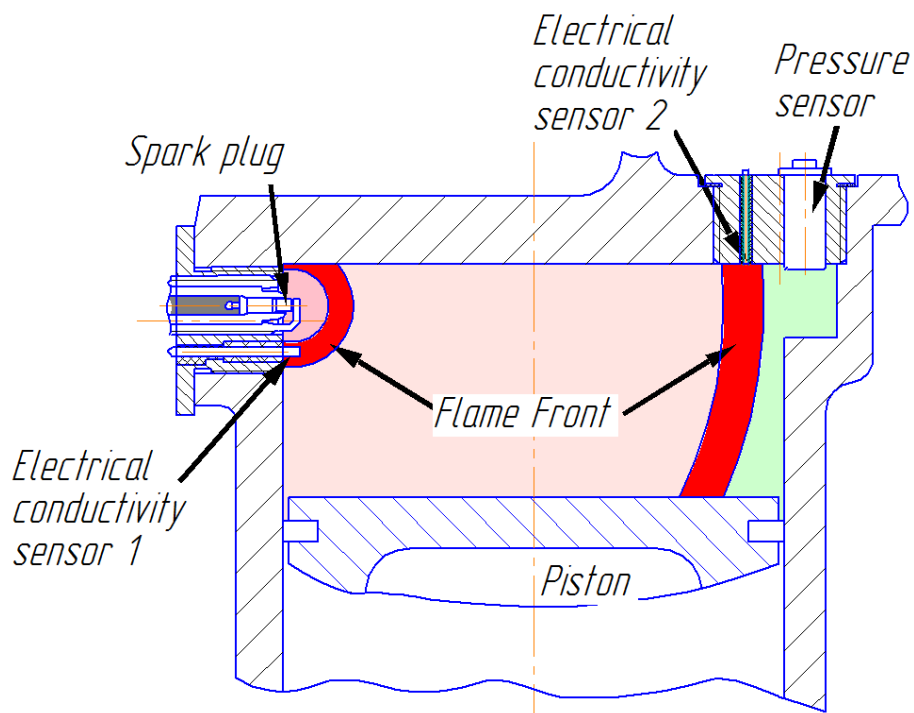
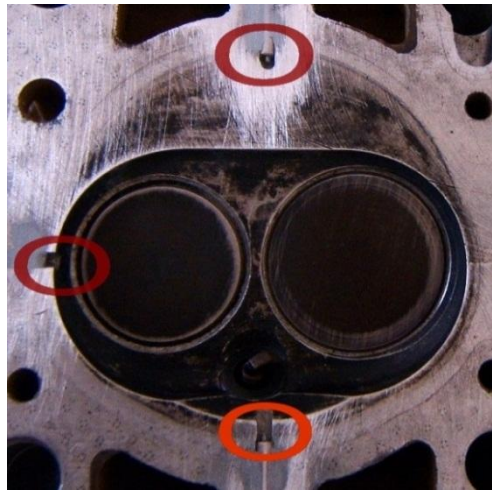


Рисунок 2.3 - Схема расположения датчиков для измерения электропроводности пламени в УИТ-85



а) б) в)

Рисунок 2.4 - Общий вид датчиков для исследования электропроводности пламени в УИТ-85: а) медный электрод у свечи зажигания; б) стальной электрод в переходнике с датчиком давления; в) пять стальных электродов в одном корпусе.



а)



б)



в)

Рисунок 2.5 – Общий вид датчиков для исследования электропроводности пламени, в двигателе VAZ-2111: а) стальные датчики в керамической оболочке; б) алюминиевые датчики в головке блока цилиндров; в) алюминиевые датчики в специальной пластине.

Применяемая электрическая схема для измерения электропроводности пламени для установки УИТ-85 с пятиэлектродным датчиком (Рисунок 2.4в) при работе на бензине приведена на рисунке 5. Источником питания здесь являлся гальванический элемент +9 V. При работе УИТ-85 с датчиками (рисунок 2.4а и рисунок 2.4б) применялась электрическая схема, изображенная на рисунке 2.7, где в качестве источника питания применялся источник постоянного тока с напряжением 360 V, которые получаются путём преобразования переменного тока после стабилизатора напряжения 220 V в постоянный.

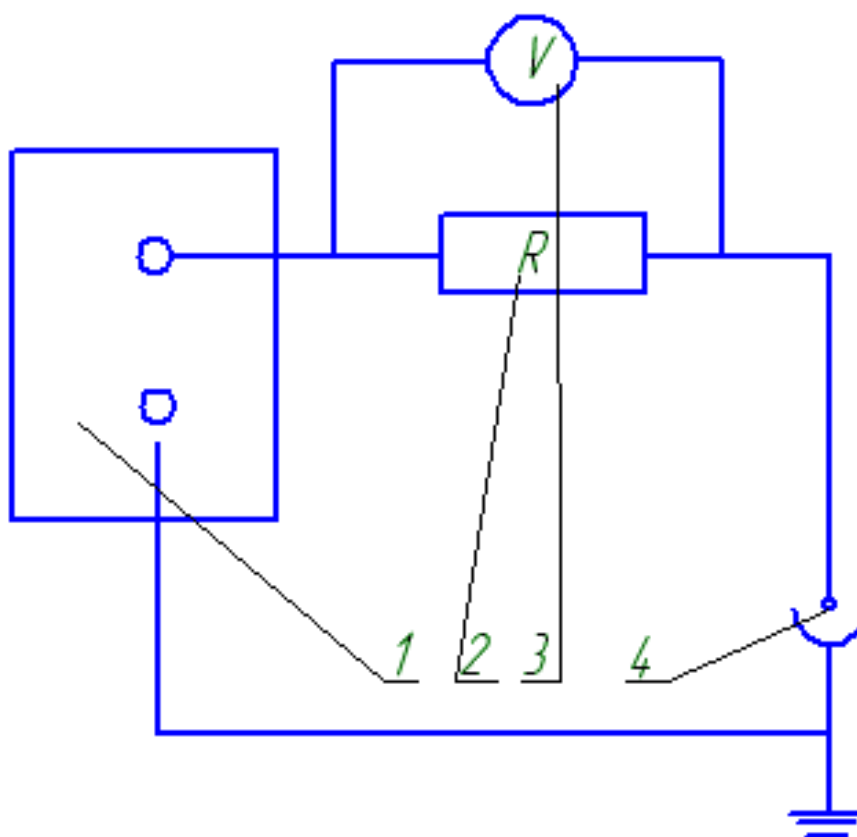


Рисунок 2.6 - Схема измерения электропроводности пламени: 1 – Источник постоянного тока «Крона» 9V; 2 – измерительный резистор; 3 – осциллограф; 4 - датчик электропроводности

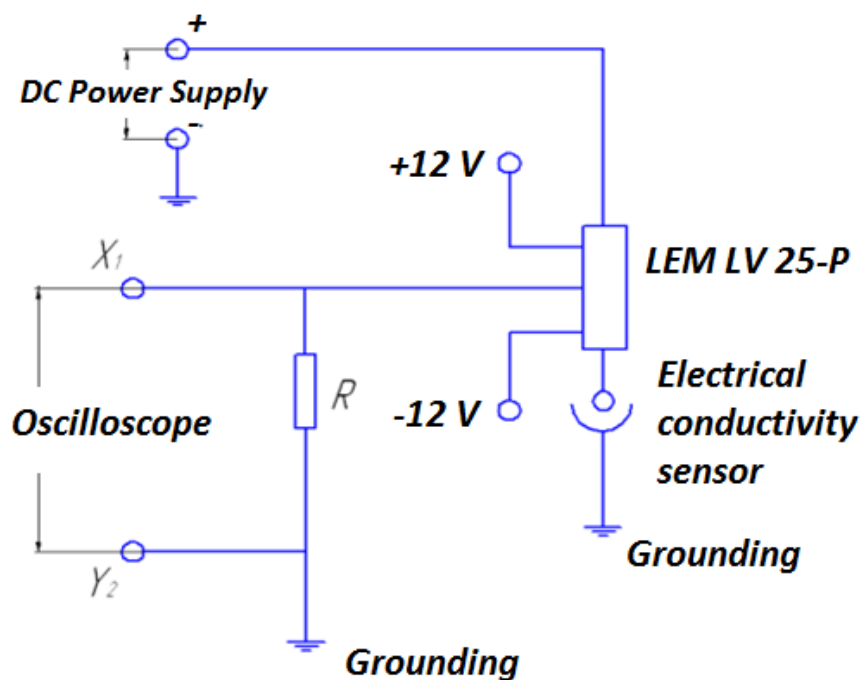


Рисунок 2.7 - Схема измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой

Исследования электропроводности пламени в двигателе ВАЗ проводились первоначально с датчиками, изображенными на Рисунке 2.5а и схеме измерения электропроводности пламени (Рисунок 2.6) с гальваническим элементом +9 V. Основные испытания проводились уже с алюминиевыми датчиками, представленными на Рисунке 2.5б и Рисунке 2.5с, с многоканальной схемой измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой (Рисунок 8) при питании от источника постоянного тока с напряжением 600 V.

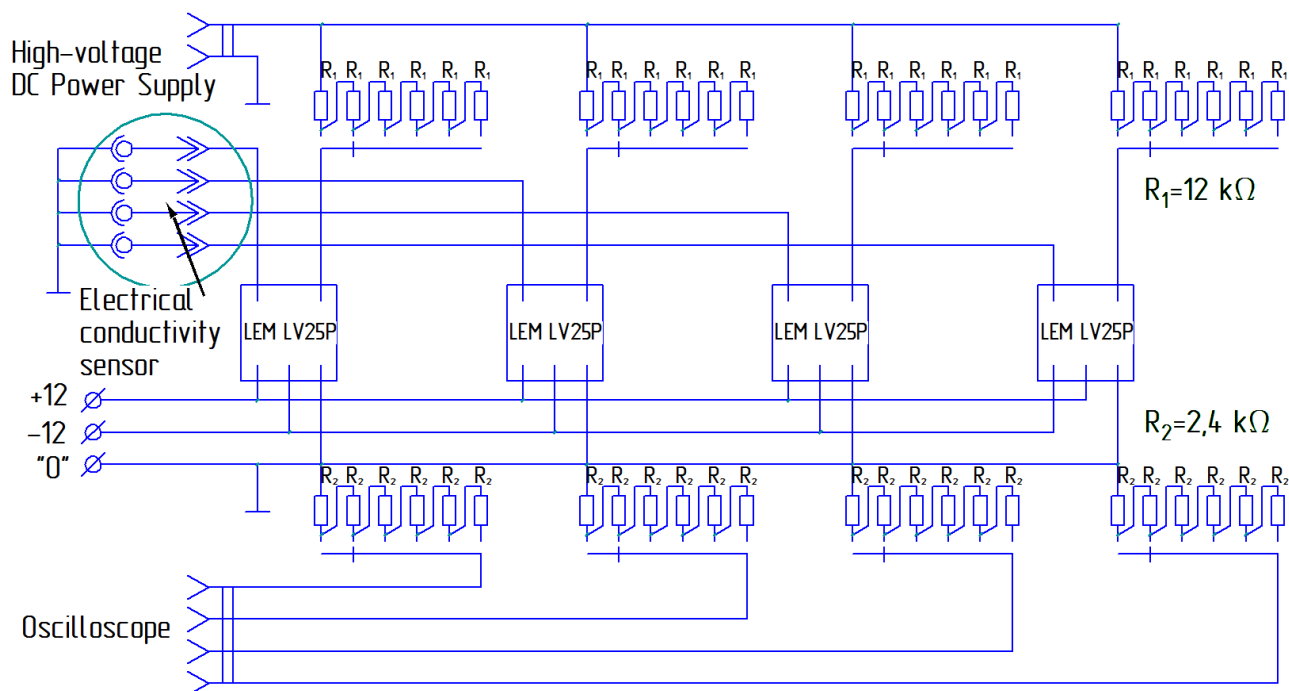


Рисунок 2.8 - Многоканальная схема измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой

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

ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода

3.1 Результаты экспериментальных исследований

Рассмотрим сначала результаты, полученные на одноцилиндровой установке УИТ-85 при степени сжатия 7 и частоте вращения 900 мин^{-1} . На рисунке 3.1 представлены результаты сравнения электропроводности пламени на первом электроде (в 80 мм от свечи зажигания) пятиэлектродного датчика при работе на бензине и при изменении полярности напряжения, подаваемого на электрод, с +9 на -9 V. Мы видим, что электропроводность пламени отражает изменение угла опережения зажигания в связи с тем, что при большем угле опережения зажигания пламя подходит к электроду датчика при меньшем объеме и большем давлении, что повышает плотность частиц во фронте пламени и, следовательно, повышает характеристики электропроводности. То же самое относится и к составу смеси, т.е. смеси с большей скоростью сгорания имеют большую электропроводность. Результаты для всех пяти датчиков идентичны. Поэтому, для примера приведена электропроводность для ближайшего к свече зажигания. Оценим влияние полярности на характеристики электропроводности в камере сгорания поршневого ДВС с искровым зажиганием. Корпус двигателя многократно заземлен, через опоры, через электродвигатель, через заземление от специального провода от блока цилиндров к металлическому стержню, вкопанному в грунт. Поэтому подавая на электрод положительный заряд мы имеем дело с ионной проводимостью, а подавая на электрод отрицательный заряд у нас уже электронная проводимость. Количество

электронов во фронте пламени больше, чем количество ионов. Поэтому электропроводность при подаче отрицательного заряда более чем в 2 раза превосходит электропроводность при подаче положительного заряда на электрод. При этом, в связи с работой на степени сжатия 7, температура за фронтом пламени, как правило ниже температуры термоионизации, что показывает сразу идущий к нулю сигнал электропроводности. А в случае с отрицательным напряжением на электродах, мы во всех случаях видим электрическую проводимость электронов и за фронтом пламени, имеющих термическую природу.

К недостаткам использования отрицательного напряжения для оценки электропроводности пламени можно отнести большой шум сигнала, активное отображение характеристик искрового разряда и сложность в фиксации окончания сгорания в зоне установки датчика. В тоже время использование гальванического элемента с напряжением на электроде датчика в +9V. Это давало низкий уровень сигнала при работе на переобогащённых или бедных смесях, где процесс сгорания затруднен.

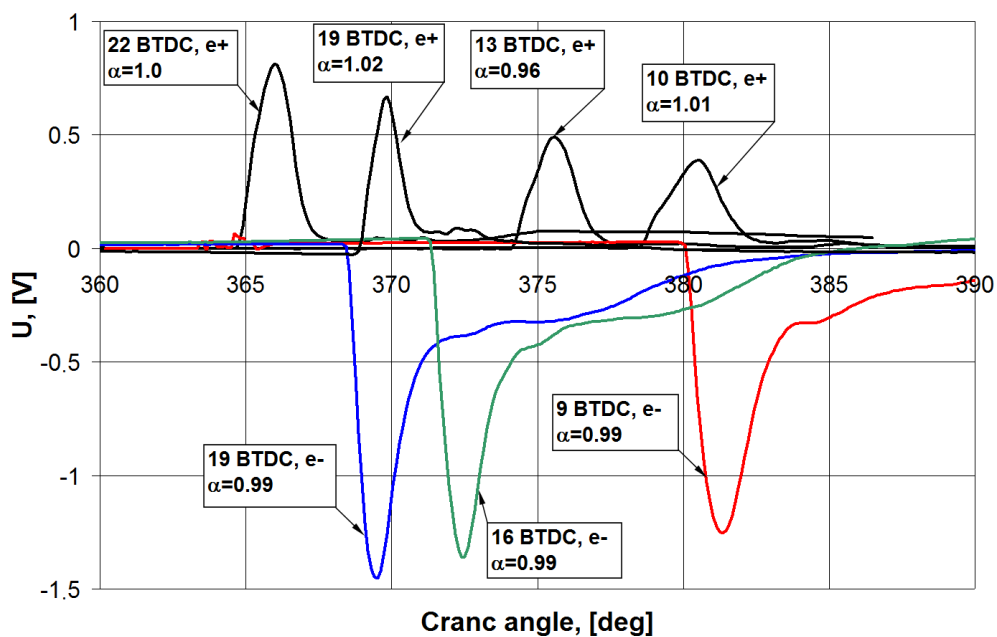


Рисунок 3.1- Электропроводность пламени на первом электроде пятиэлектродного датчика при работе на бензине, при изменении полярности напряжения подаваемого на электрод с +9 на -9V

Так при работе двигателя ВАЗ (схема датчиков представлена на рисунке 2.5а) на нагрузке в 20% при стехиометрическом составе смеси приемлемым был сигнал только с датчика у свечи зажигания (Рисунок 3.2), на датчике у выпускного клапана сигнал был слабым, трудно читаемым (Рисунок 3.3) и при любом ухудшении процесса сгорания практически сливался с шумом. На электроде в зоне вытеснителей электропроводность не фиксировалась. Возможно не доходило пламя (неудачное выбранное место для расположения электрода), или сигнал был слишком слаб для распознавания. Сравнивая характеристики сигналов электропроводности пламени на идентичных датчиках расположенных у свечи зажигания и у выпускного клапана, отмечается большие значения электропроводности на датчике у свечи зажигания. Это объясняется тем, что фронт пламени у свечи зажигания остывает от состояния плазмы при воспламенении электрической искрой при формировании устойчивого очага горения. Он имеет температуру, а, следовательно, и характеристики электропроводности, выше, чем у фронта пламени в зоне выпускного клапана в конце процесса сгорания на расширении.

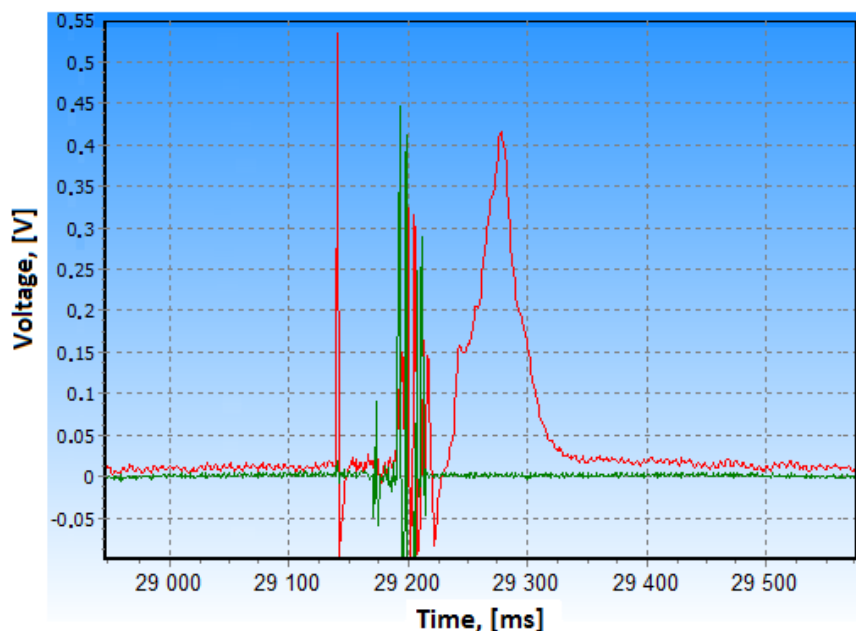


Рисунок 3.2 – Электропроводность пламени в 6 мм под свечей зажигания при работе на бензине в двигателе ВАЗ-2111 при частоте вращения 1620 мин^{-1} , нагрузке 20% и питании от гальванического элемента +9V

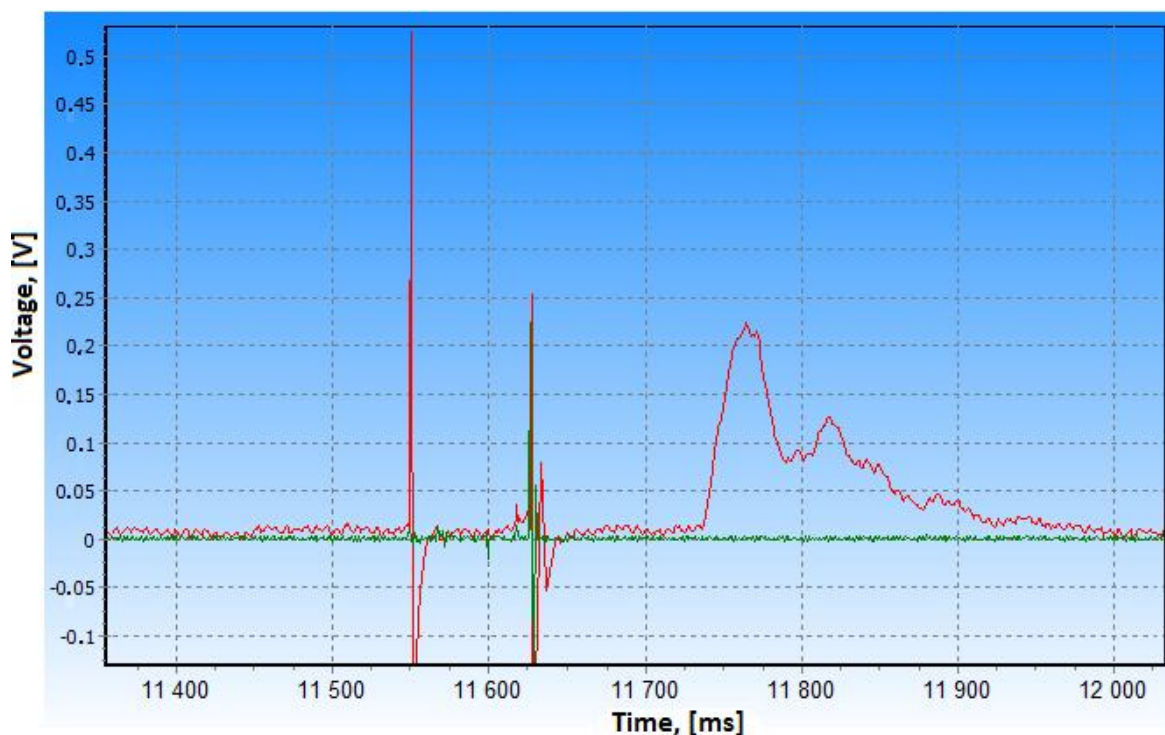


Рисунок 3.3 – Электропроводность пламени у выпускного клапана на расстоянии в 44 мм от свечи зажигания при работе на бензине в двигателе ВАЗ-2111 при частоте вращения 1620 мин^{-1} , нагрузке 20% и питании от гальванического элемента +9V

Поэтому была применена многоканальная схема измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой (Рисунок 2.7 и Рисунок 2.8). Для УИТ-85 применялась четырехканальная схема, а для двигателя ВАЗ-2111 восьмиканальная схема измерения электропроводности пламени с гальванической развязкой. В этой схеме на электрод подавалось напряжение от высоковольтного источника питания постоянного тока, преобразующего переменный ток в бытовой сети 220 V с частотой 60 Гц, после стабилизатора напряжения в постоянный ток от 300 до 900 V. В работе применялись напряжения в 360 и 600 V.

Были проведены экспериментальные исследования с новой схемой измерения электропроводности пламени на одноцилиндровой установке УИТ-85 с использованием датчиков, представленных на рисунке 2.4а и рисунке 2.4б и расположенных в камере сгорания, как это показано на

рисунке 2.3. Исследования проводились при работе на бензине и сжатом природном газе (CNG), а также при добавке водорода для активации процесса сгорания (до 6% для бензина и до 15% от массы топлива для CNG) [26, 27, 28]. Для примера на рисунке 3.4 приведены характеристики электропроводности пламени при работе на CNG. Значения, полученные при работе бензине, аналогичны приведенным на рисунке 3.5, полученным на CNG, только процесс сгорания протекает несколько быстрее и с большими значениями электропроводности.

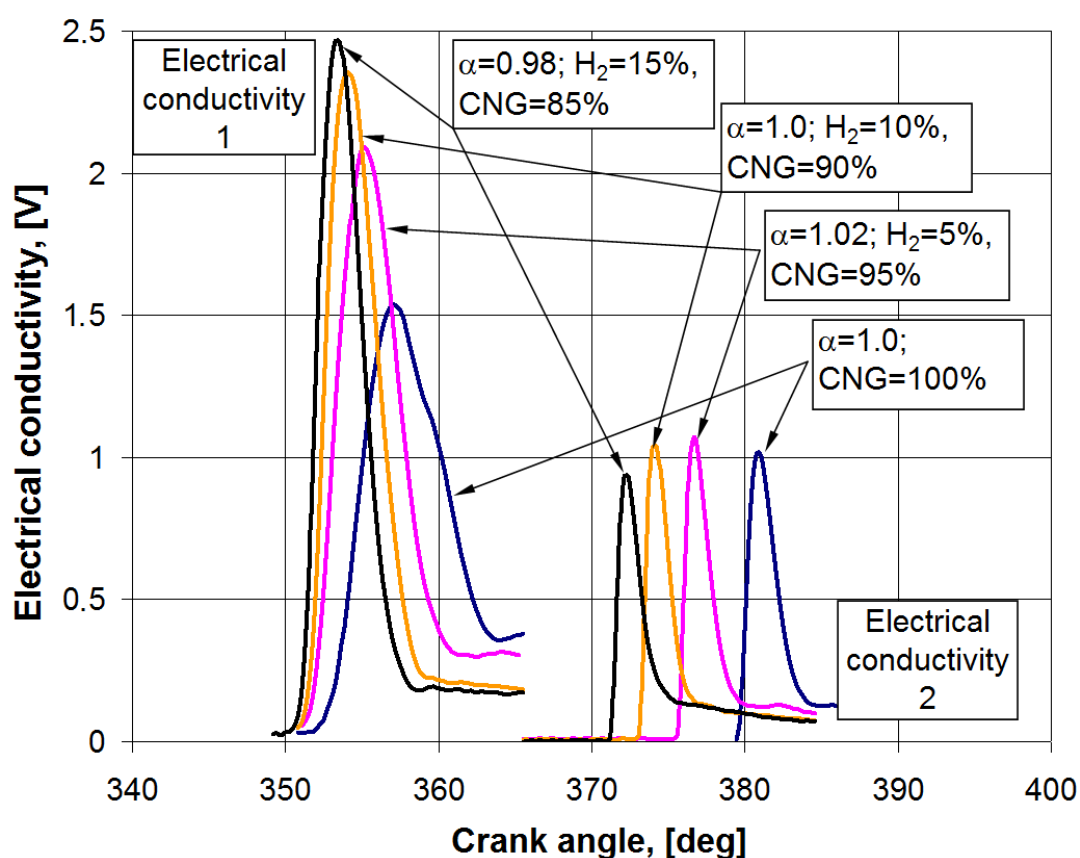


Рисунок 3.4 – Электропроводность пламени при работе на CNG в УИТ-85 при частоте вращения 900 мин^{-1} , 13 BTDC, степени сжатия 7 на медном электроде в 7 мм от свечи зажигания и стальном электроде в 80 мм от свечи зажигания.

Стальной электрод, расположенный в 80 мм от свечи зажигания в конце камеры сгорания идентичен электродам, применяемым в серии испытаний на УИТ-85 (Рисунок 3.1) и двигателе ВАЗ (Рисунок 3.2 и Рисунок

3.3) при питании от гальванического элемента +9 V. Как и предполагалось увеличение напряжения с 9 до 360 V увеличило стабильность и величину сигнала при одинаковых параметрах электрода датчика. Сравнивая значения электропроводности пламени, получаемых на медном (в 7 мм от свечи зажигания) и стальном (в 80 мм от свечи зажигания) электроде, можно отметить большие значения электропроводности на электроде у свечи зажигания. Но электрод у свечи зажигания имеет значительно большую площадь контакта с фронтом пламени, так как он, при одинаковом диаметре, выступает на 4 мм, а стальной электрод на 0.3 мм. Изменение доли углерода во фронте пламени путем увеличения доли водорода в газовом топливе приводит в начале к замедлению роста величины электропроводности пламени в зоне установки второго датчика, а затем и к её снижению. Это связано с тем, что как показал ряд исследований [1, 7 - 10], химионизация в зоне горения углеводородного топлива в большей степени определена ионами CHO^+ и C_3H_3^+ . Поэтому полученные результаты соответствуют известным данным, где показано, что снижение содержания доли углерода в топливе снижает электропроводность пламени. Хотя сама интенсивность протекания процесса сгорания, как это происходит при добавке водорода, увеличивается. В тоже время увеличение доли водорода в газовом топливе ($\text{CNG} + \text{H}_2$) повышает характеристики электропроводности у свечи зажигания в зоне образования устойчивого очага горения. Это отражает факт большей энергии активации для инициации процесса сгорания природного газа по сравнению с бензином и тем более с водородом. Поэтому водород повышает скорость сгорания и образует устойчивой очаг горения при больших температурах фронта пламени, что и отражается на увеличении электропроводности на первом датчике. Влияния угла опережения зажигания на электропроводность пламени газового топлива схоже с влиянием угла опережения зажигания при работе на бензине (Рисунок 3.1), поэтому этот вопрос отдельно не рассматривался.

Проведя исследования с новой четырехканальной схемой измерения электропроводности пламени на одноцилиндровой установке УИТ-85, на её базе была создана восьмиканальная схема непрерывной диагностики процесса сгорания для двигателя ВАЗ-2111 с восемью алюминиевыми электродами, расположенными в головке блока цилиндров, как это показано на рисунке 2.5б. Применялся источник постоянного тока с напряжением в 600 В. Исследуемым режимом работы являлся режим холостого хода при частоте 880 мин⁻¹ согласно штатным калибровкам контроллера. На этом режиме наблюдается максимальная неравномерность рабочего процесса при значительном содержании остаточных газов. Данные условия протекания сгорания снижают интенсивность химических реакций во фронте пламени, что отражается в виде уменьшения амплитуды ионного тока, как на датчиках у свечи зажигания, так и на датчиках, расположенных у выпускного клапана. В качестве топлива использовали CNG (Рисунок 3.5) и бензин (Рисунок 3.6). На рисунке 3.5 и рисунке 3.6 показана картина регистрируемых осциллографом сигналов, а именно момента подачи искрового разряда 1, индикаторного давления, получаемого тензометрическим датчиком 2, электропроводность пламени на датчике в 15 мм от свечи зажигания 3 и электропроводность пламени на датчике в 45 мм от свечи зажигания 4. Анализ сигналов электропроводности пламени, приведенных на рисунке 3.5 показано наличие четкого сигнала электропроводности на обоих датчиках, несмотря на сложные условия сгорания природного газа на режиме холостого хода. Проведем сравнение характеристик электропроводности, приведенных на рисунке 3.5 и рисунке 3.6 при работе на CNG и бензине при одинаковом 35 BTDC и стехиометрическом составе смеси. При работе на бензине заметно быстрее происходит распространение фронта пламени в начальной фазе сгорания. В связи с чем фронт пламени достигает электрода под свечей зажигания на такте сжатия, а при работе на CNG в районе верхней мёртвой точки (ВМТ), что и отражается в большей величине электропроводности пламени. В тоже время за счет более быстрого сгорания

бензина, по сравнению с CNG, фронт пламени также раньше достигает второго электрода у выпускного клапана. Это соответствует большим значениям давления и температуры за счет сгорания в меньшем объеме, тем самым повышая количество и плотность ионов во фронте пламени, что увеличивает его электропроводность.

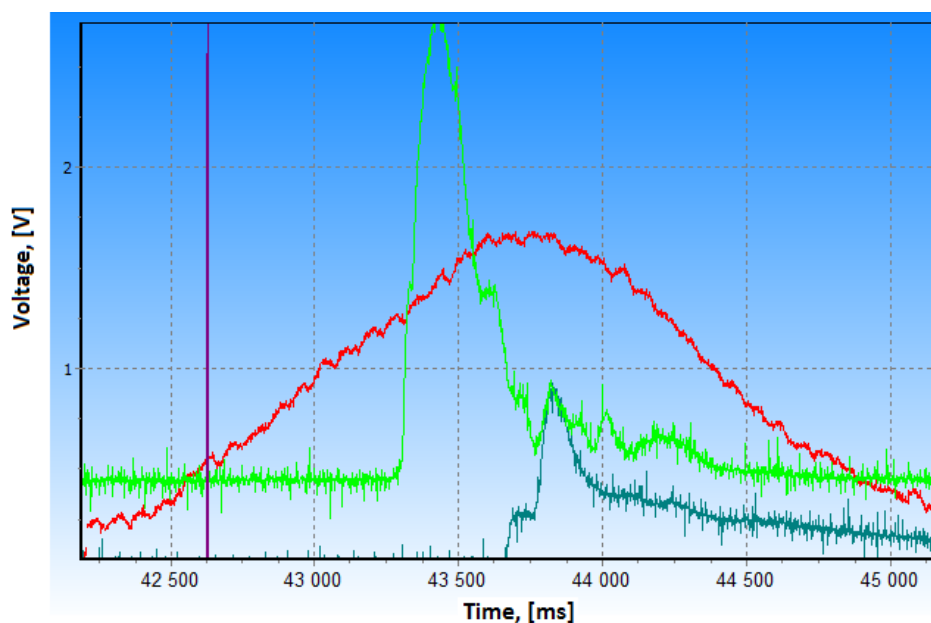


Рисунок 3.5—Электропроводность пламени при работе двигателя ВАЗ-2111 на CNG при частоте вращения 880 мин^{-1} на режиме холостого хода.

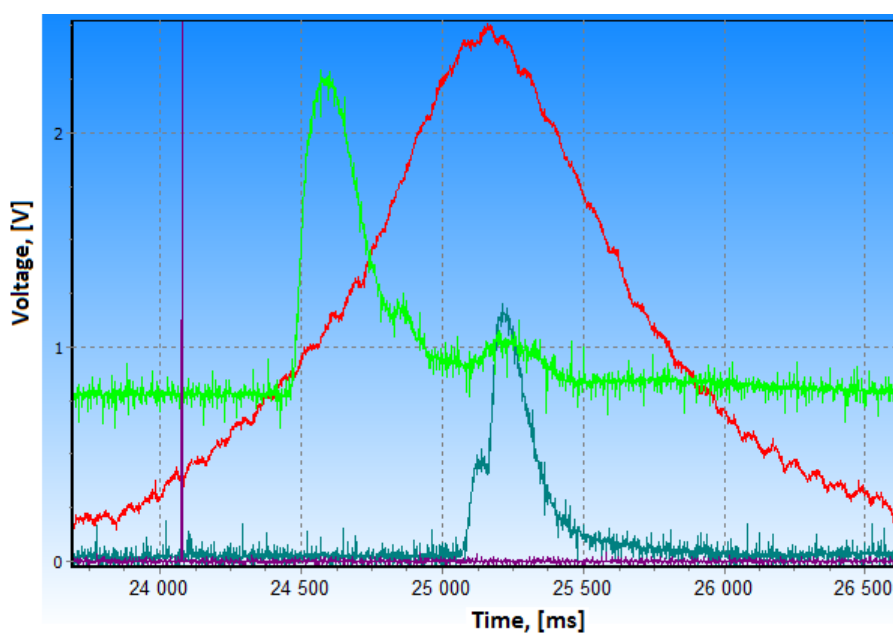


Рисунок 3.6—Электропроводность пламени при работе двигателя ВАЗ-2111 на бензине в при частоте вращения 880 мин^{-1} на режиме холостого хода.

Анализ влияния материала электрода датчика электропроводности на характеристики получаемого сигнала, показал, что электрическая проводимость стали, алюминия и меди во много раз больше величины электропроводности пламени. Следовательно, материал электрода датчика не влияет на характер сигнала электропроводности, либо его влияние минимально и соответствует уровню погрешности эксперимента. Из внешних условий системы измерения можно отметить следующие значимые факторы, оказывающие существенное влияние на характеристики электропроводности пламени. Первая характеристика, это площадь контакта электрода с фронтом пламени. Чем больше площадь контакта, тем устойчивей и интенсивнее регистрируемый сигнал. Вторая характеристика, это место расположение электрода. В зоне свечи зажигания сигнал сильнее, по мере удаления от свечи зажигания и особенно в зоне догорания сигнал слабеет, тем самым отражая снижение интенсивности процесса сгорания. Третья характеристика, это величина напряжения подаваемого на электрод датчика. Здесь с увеличением напряжения происходит рост величины и стабильности сигнала. Как известно из литературы [29 - 33] этот эффект будет происходить с замедляющимся ростом до напряжения насыщения, после которого увеличение напряжения не сказывается на электропроводности пламени. В данном случае, как недостаток применения высокого напряжения для оценки процесса сгорания, следует отметить, что повышая напряжение мы повышаем степень внешнего воздействия на объект исследования, так как известно, что электрический ток интенсифицирует процесс сгорания. Тем самым увеличивая напряжение мы увеличиваем локальную скорость сгорания в зоне датчика, влияя на процесс сгорания. Поэтому четвертая характеристика также оказывается достаточно важной для исследовании процесса сгорания в ДВС, а именно полярность напряжения, подаваемого на электрод. То есть подавая на электрод отрицательный заряд мы можем в несколько раз снизить напряженность электрического поля для получения стабильного сигнала, тем самым снизив свое воздействие на

протекание процесса сгорания. Но для применения этого подхода требуется проведения дополнительных исследований, так как подавляющее большинство исследований проводилось с положительно заряженным электродом, а исследований с отрицательно заряженным электродом очень мало для получения достоверной и полной картины. Так возможно получение стабильного сигнала при отрицательном напряжении на электроде в 9 – 12 V, что возможно осуществить без значительных затрат на борту автомобиля.

Глава 4 Выявление возможностей повышения эффективности газового ДВС за счет контроля процесса сгорания по электропроводности пламени

Для выявления возможности оценки скорости тепловыделения по электропроводности пламени была проведена обработка экспериментальных данных с выявлением характеристик изменения работы и внутренней энергии на элементарном участке индикаторной диаграммы величиной 0.27 градуса угла поворота (рисунок 4.1).

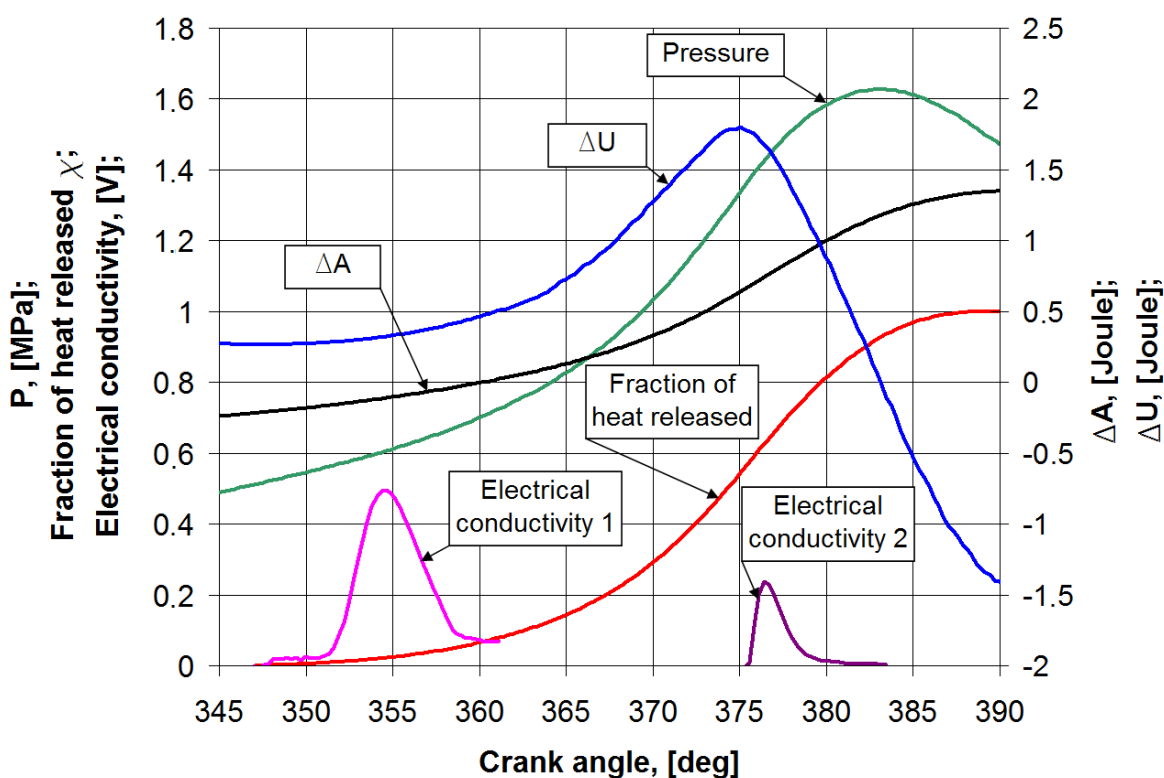
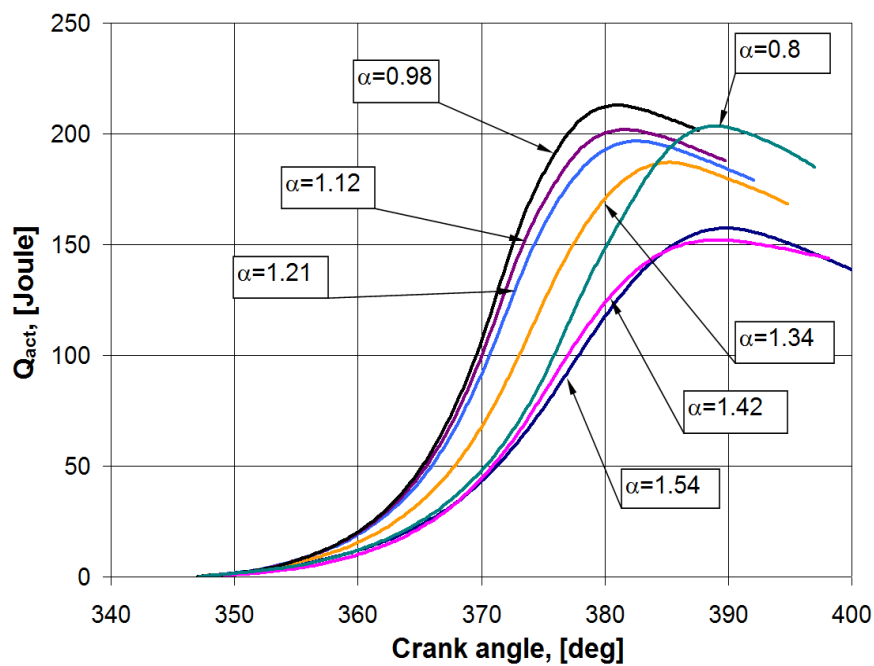


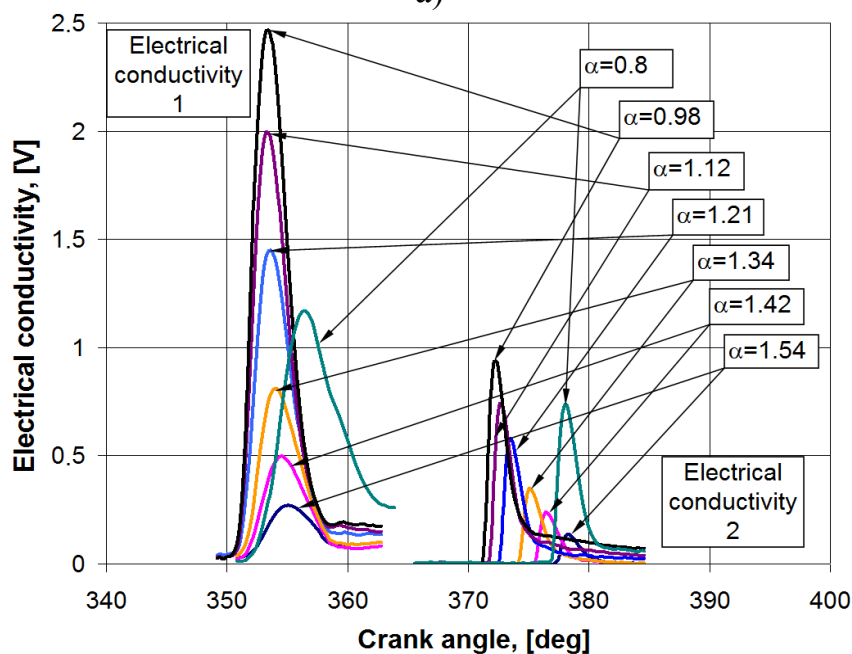
Рисунок 4.1 – Изменение основных термодинамических параметров цикла характеризующих скорость тепловыделения и электропроводность пламени для УИТ-85 при работе на CNG = 85%, $H_2 = 15\%$

В результате проведенного термодинамического анализа индикаторных диаграмм [9 – 12] получены характеристики количества активно выделившегося тепла в процессе сгорания. Где Q_{act} это сумма изменения

работы и внутренней энергии от начала процесса сгорания до его окончания. Она характеризует количество активно выделившейся энергии от момента воспламенения в течении всего процесса сгорания. Результаты влияния состава смеси, при варьировании доли водорода в топливе, на количество выделившегося тепла приведены на рисунках 4.2а, 4.3а, 4.4а и 4.5а.



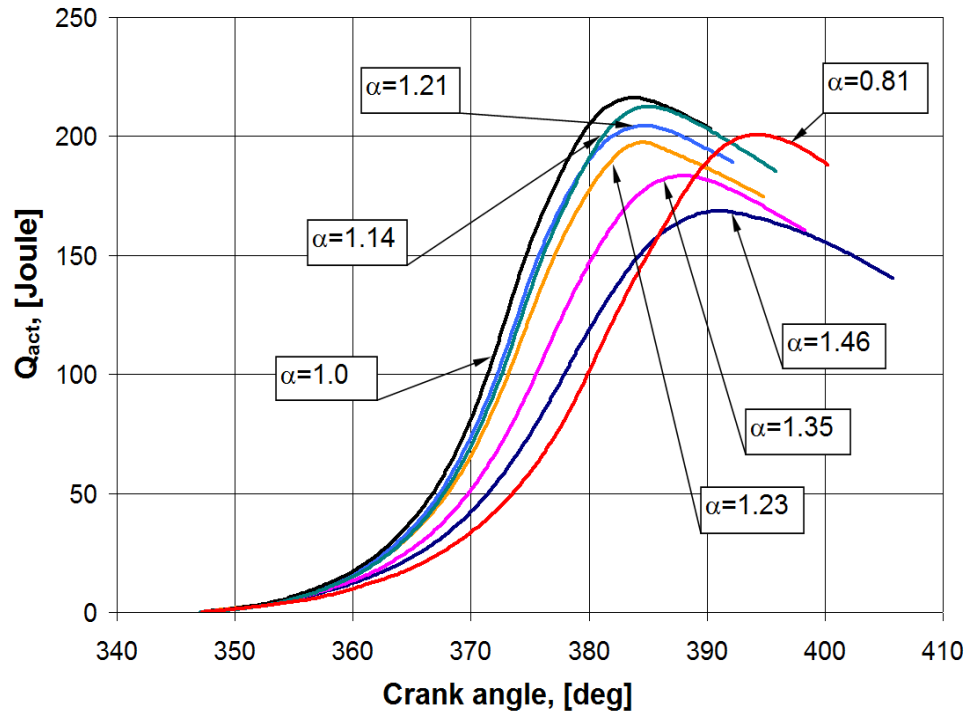
а)



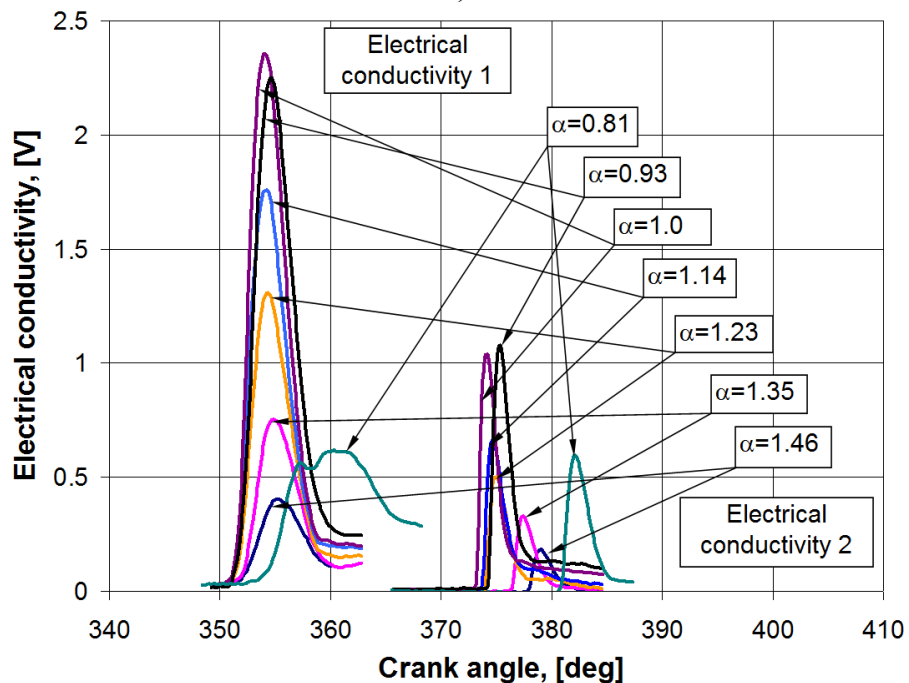
б)

Рисунок 4.2 – 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 4.2б, 4.3б, 4.4б и 4.5б.



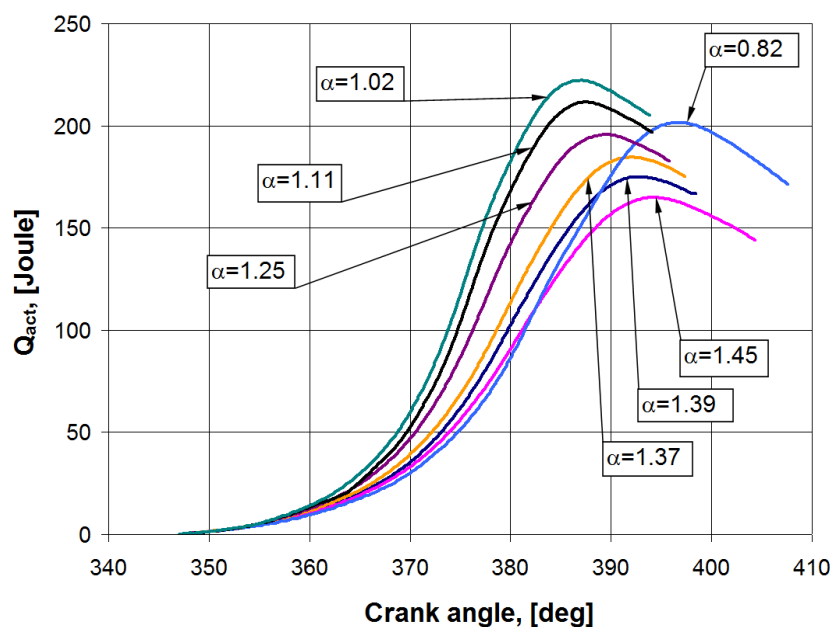
а)



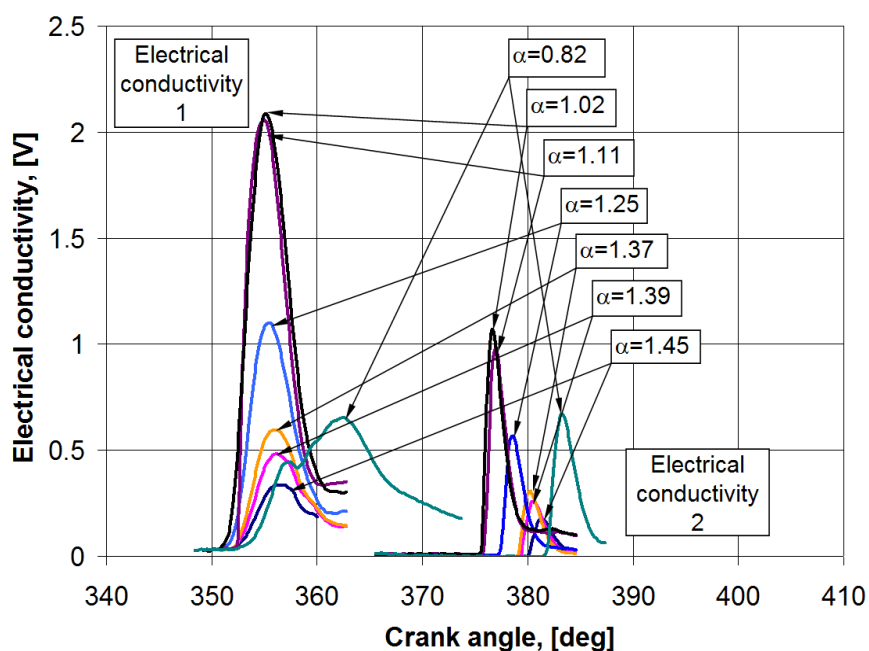
б)

Рисунок 4.3 – 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

Из рисунков, где показаны характеристики электропроводности, мы видим, что с увеличением доли водорода повышается интенсивность сигнала и его стабильность, как на датчике у свечи зажигания, так и на датчике ионизации 2, расположенном в удаленной от свечи зажигания части камеры сгорания.

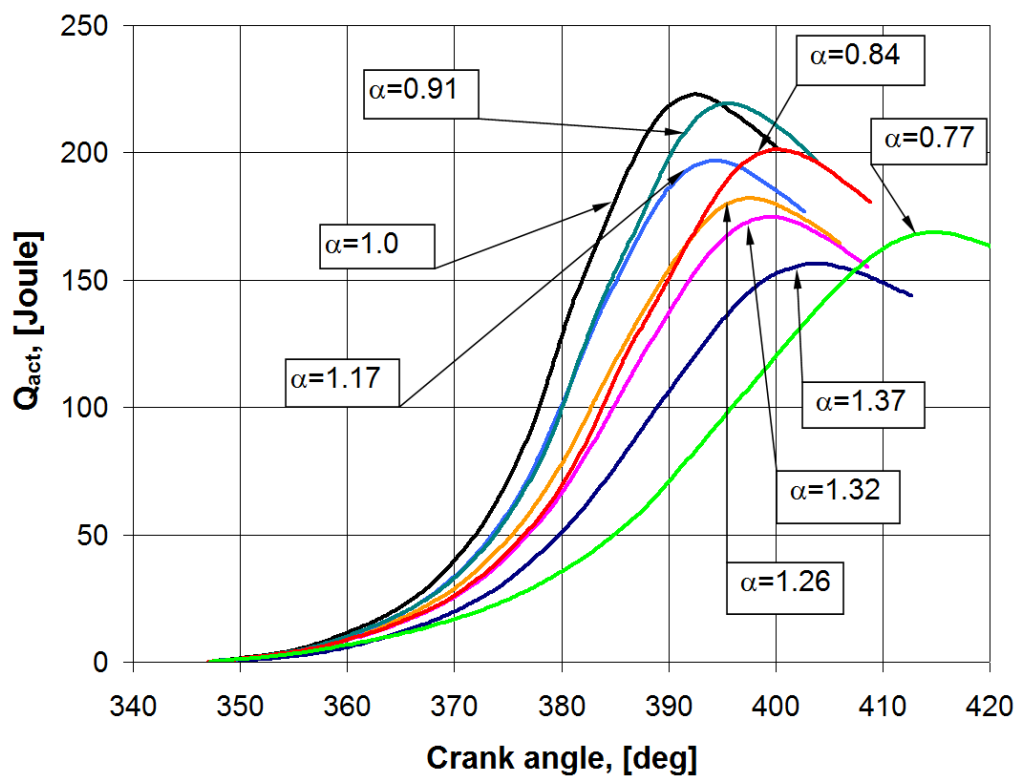


а)

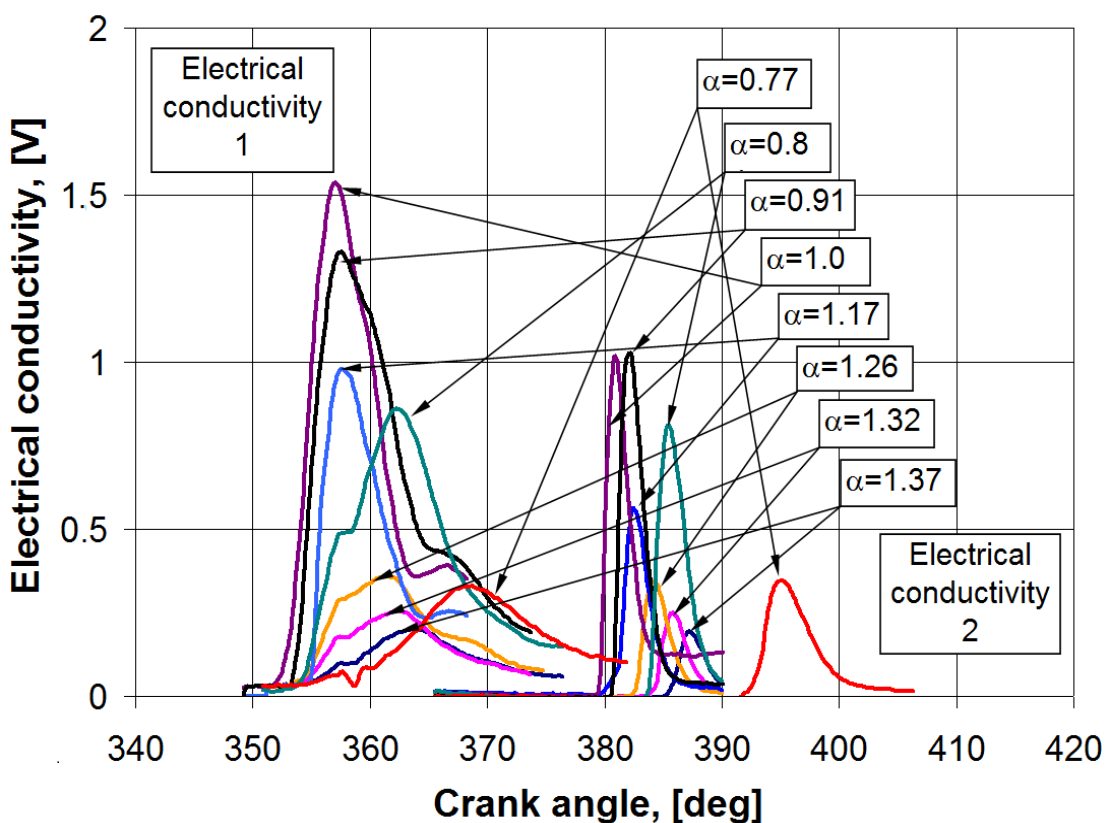


б)

Рисунок 4.4 – Влияние коэффициента избытка воздуха при составе смеси $CNG = 95\%$, $H_2 = 5\%$ на: (а) количество активно выделившегося тепла в процессе сгорания и (б) характеристики электропроводности пламени

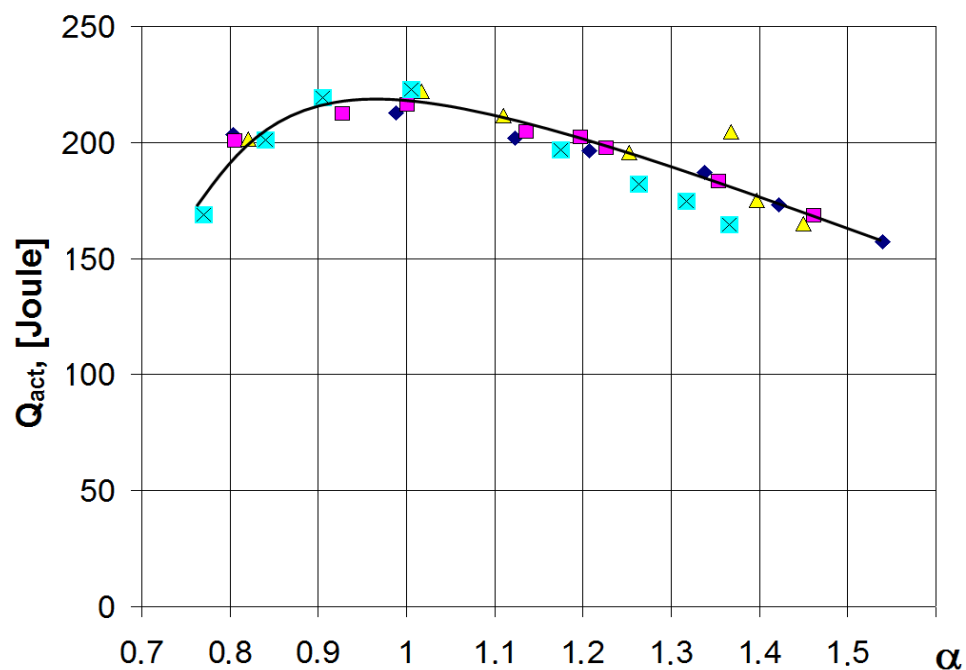


a)

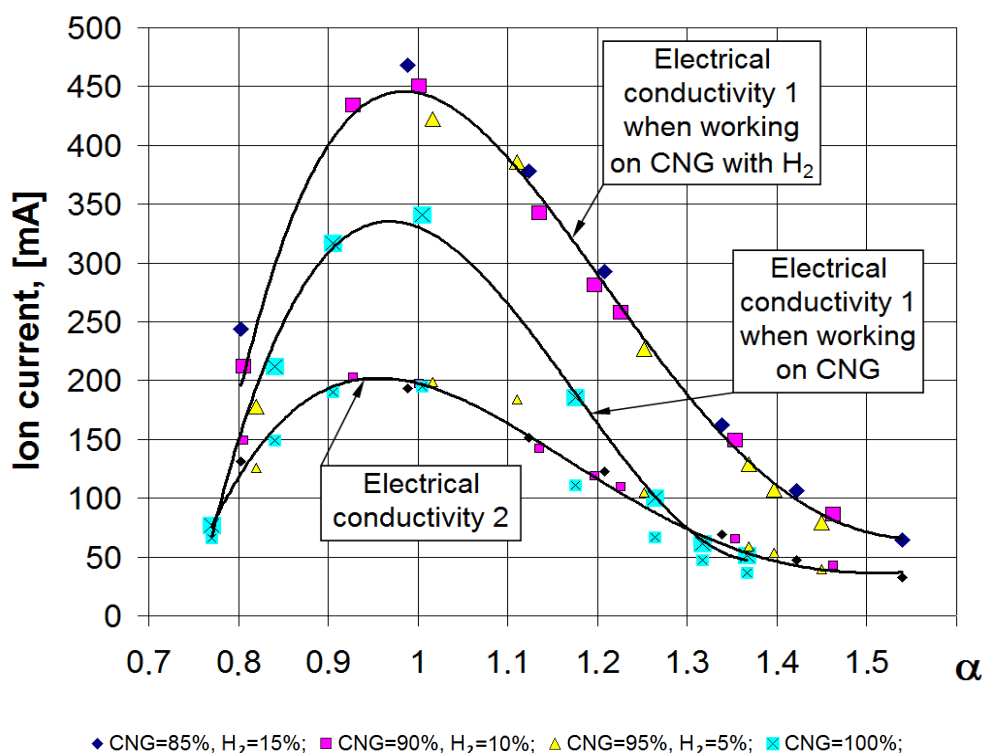


б)

Рисунок 4.5 – Влияние коэффициента избытка воздуха при составе смеси CNG = 100% на: (а) количество активно выделившегося тепла в процессе сгорания и (б) характеристики электропроводности пламени



a)



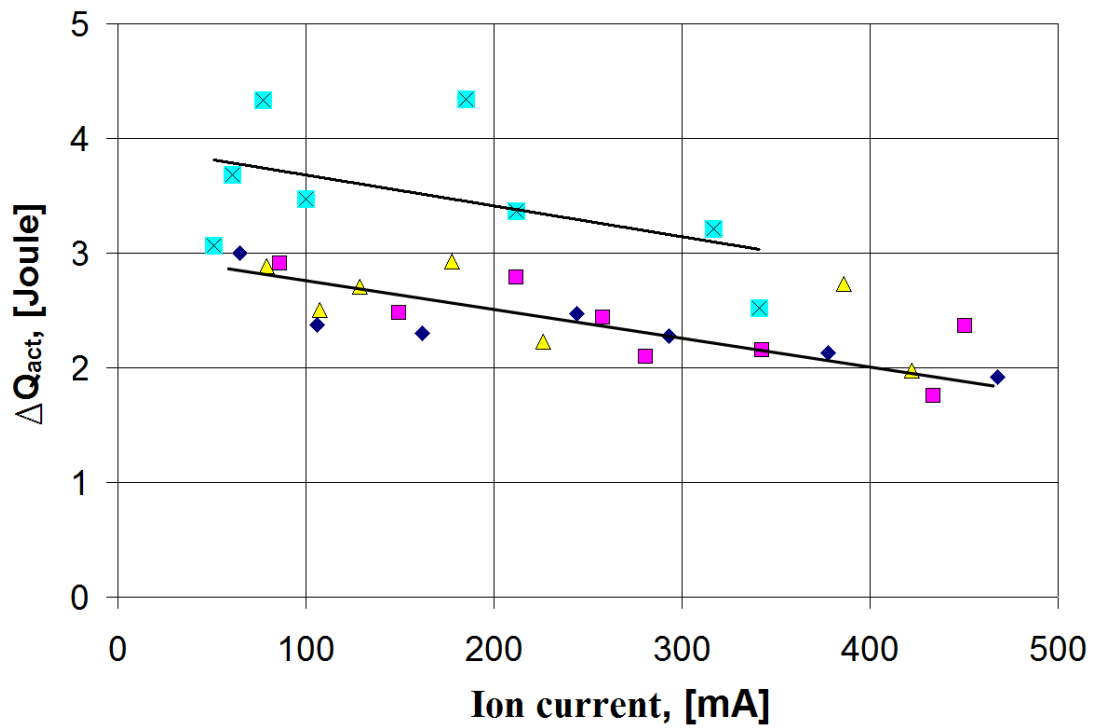
б)

Рисунок 4.6 – Зависимость от коэффициента избытка воздуха при варьировании доли водорода: (а) количества активно выделившегося тепла в процессе сгорания; (б) амплитуды ионного тока электропроводности фронта пламени

Проводя анализ изменения количества активно выделившегося тепла в процессе сгорания от коэффициента избытка воздуха (рисунок 4.6), можно отметить, что на режимах, где наблюдается активное сгорание, значения лежат примерно на одной кривой, исключение лишь составляет зона обеднения при работе на СПГ ($\alpha = 1.26 - 1.37$), где наблюдается вялое горение, что сказывается на снижении эффективности тепловыделения. Зависимость амплитуды ионного тока электропроводности фронта пламени от состава смеси показана на рисунке 4.6б. Где видно, что для удаленного от свечи зажигания датчика ионизации 2 все точки легли на одну кривую, в независимости от количества добавляемого водорода. Для датчика ионизации 1, расположенного у свечи зажигания, амплитуда сигнала при работе на CNG находится несколько ниже соответствующих значений при добавке водорода.

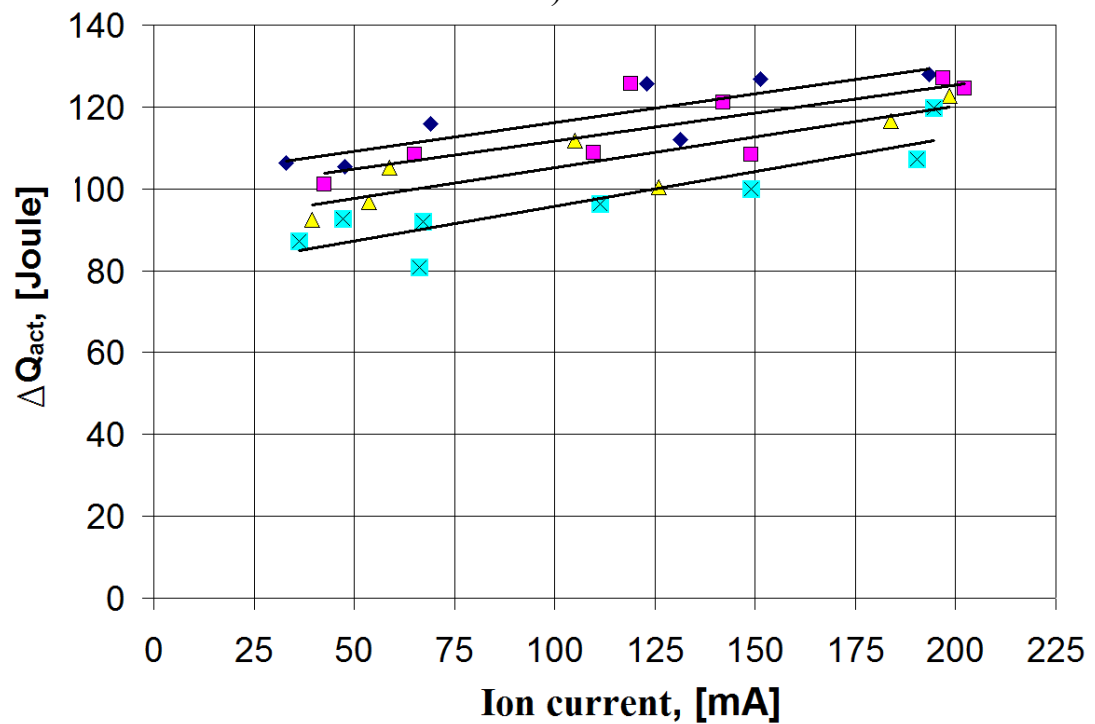
Оценивая возможности контроля за протеканием процесса сгорания по датчикам ионизации, был проведен анализ характеристик электропроводности и выявлены следующие закономерности, связывающие их с параметрами тепловыделения. Так на рисунке 4.7 приведены зависимости количества активно выделившегося тепла в момент появления сигнала на датчике от амплитуды сигнала ионного тока при варьировании доли водорода.

Для 1-го датчика ионизации характерно некоторое уменьшение количества выделившегося тепла от момента воспламенения до появления сигнала на датчике ионизации. Это связано с тем, что процесс сгорания, который развивается более активно, быстрее формирует устойчивый фронт пламени и начинает свое распространение по камере сгорания. По этой причине наблюдается расслоение между значениями на рисунке 4.7 при работе на CNG и CNG с добавками водорода. Рассматривая 2-й датчик отмечаем наличие характерной зависимости показывающей, что для больших амплитуд сигнала ионного тока характерно увеличение количества выделившейся энергии в момент появления сигнала на датчике.



◆ 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%;

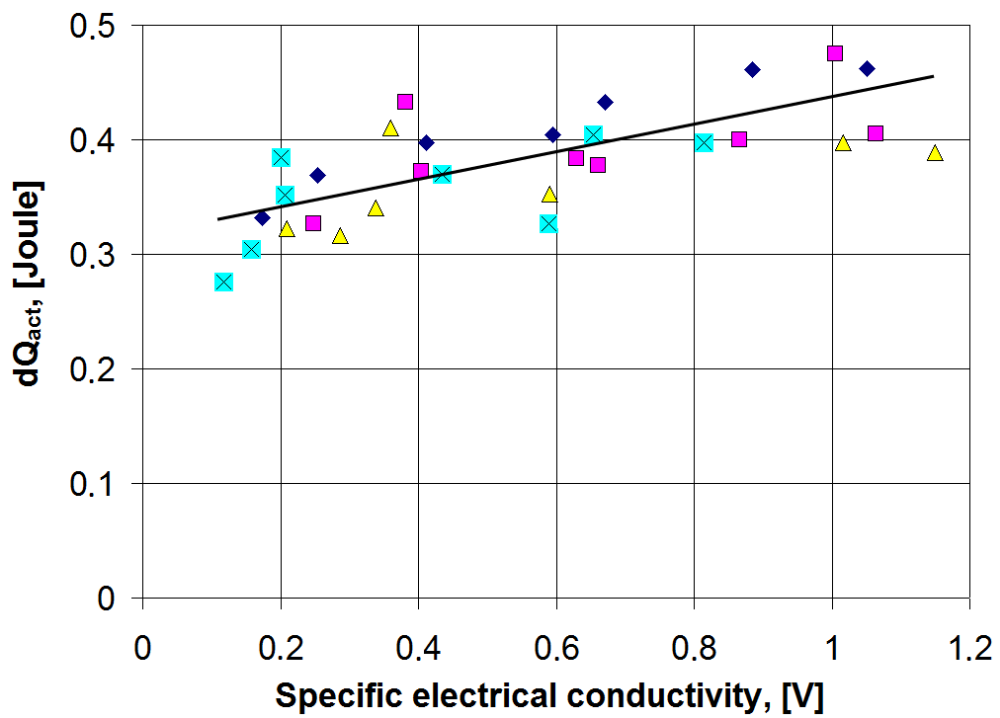
б)

Рисунок 4.7 – 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

Это связано с тем, что увеличение амплитуды сигнала ионного тока связано с большими скоростями сгорания, а, следовательно, в момент появления сигнала на датчике объем свежей смеси меньше. Отсутствие четкой корреляции количества выделившейся энергии в момент появления ионного тока на 1-ом датчике объясняется близким расположением электрода к свече зажигания (расстояние между ними 7 мм) и высокой стохастичностью процесса воспламенения и сгорания. Полученные данные показывают, что для оценки тепловыделения в цилиндре двигателя, более информативным является датчик, расположенный в более удаленной части камеры сгорания, так как он суммирует влияние водорода на процесс сгорания в первой и второй фазах.

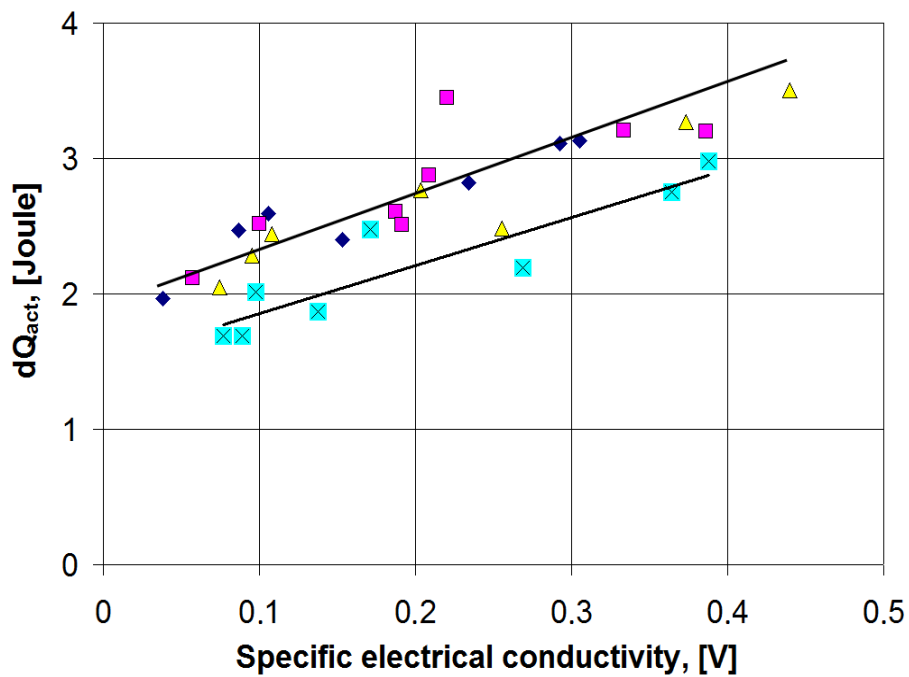
Оценивая связь более тонких параметров электропроводности со скоростью тепловыделения, введено понятие "плотности тока" на датчике, т.е. это средняя величина сигнала. Также принята средняя скорость тепловыделения в зоне сигнала на датчике ионизации, показывающая среднее количество выделившейся теплоты за 0.27° ПКВ. Зависимость данных параметров представлена на рисунке 10, где 10а это зависимость для 1-го датчика ионизации, а 4.8б для 2-го.

Видно, что увеличение средней величины сигнала ионного тока отражает увеличение средней скорости тепловыделения в зоне датчика ионизации. Принципиального влияния изменения доли водорода в газовом топливе на увеличение средней удельной скорости тепловыделения в зоне регистрации ионного тока на 1-ом датчике ионизации не обнаружено. В тоже время для 2-го датчика ионизации наблюдается различие между приведенной зависимостью при работе на CNG и CNG с добавками водорода.



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

а)

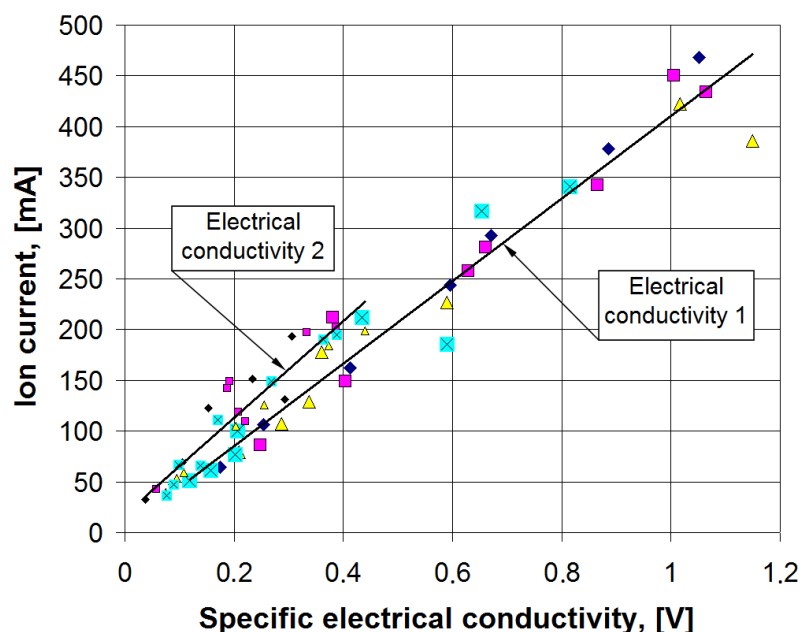


◆ CNG=85%, H₂=15%; ■ CNG=90%, H₂=10%; ▲ CNG=95%, H₂=5%; ◆ CNG=100%;

б)

Рисунок 4.8 – 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

Хотя более правильно оценивать характеристики всего сигнала электропроводности пламени на интенсивность протекания химических реакций окисления во фронте пламени, но для систем управления двигателя более простым в обработке является параметр амплитуды сигнала ионного тока. Поэтому проведено выявление зависимости величины амплитуды сигнала ионного тока от средней плотности напряжения этого сигнала, приведенная на рисунке 4.9.



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

Рисунок 4.9 – Зависимость величины амплитуды сигнала ионного тока от средней плотности напряжения этого сигнала

Наблюдаемые на рисунке 4.9 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. Тем самым наиболее легко определяемым и легко коррелируемым параметром электропроводности пламени остается амплитуда сигнала ионного тока. В результате наиболее информативным является датчик, удаленный от свечи зажигания, где фронт пламени уже сформировался и сигнал имеет легко читаемую форму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы могут быть представлены следующими выводами:

1. В данной работе предложен подход по оценке возможности диагностики процесса сгорания в ДВС с искровым зажиганием по измерению электропроводности пламени. Предложен анализ факторов, влияющих на точность и стабильность диагностики. Показано влияние характеристик распространения фронта пламени на параметры его электропроводности. Выявлено отсутствие значимого влияния материала электродов датчика на характеристики получаемого сигнала.

2. Показана целесообразность и эффективность применения диагностики процесса сгорания в ДВС с искровым зажиганием по измерению электропроводности пламени в независимости от вида применяемого топлива.

3. Выявлено, что при использовании электронной электропроводности вместо ионной повышается стабильность получаемых сигналов и расширяется зона регистрации сигнала с датчика в зону электропроводности продуктов сгорания, где термоионизация ещё не фиксируется.

4. Проведенные исследования выявили необходимость дополнительных исследований возможностей диагностики процесса сгорания по электронной электропроводности пламени и продуктов сгорания, что позволит упростить систему диагностики за счет применения меньших величин напряжения, подаваемого на электрод и позволит повысить вероятность её промышленного применения.

5. Представленные результаты экспериментальных исследований показывают значительное влияние водорода на скорость тепловыделения и, как показывает анализ электропроводности, на скорость протекания

химических реакций окисления во фронте пламени, что отражается увеличением амплитуды сигнала и увеличением его равномерности.

6. Показана возможность определения параметров скорости тепловыделения по характеристикам электропроводности, как удельно, т.е. от начала процесса сгорания до появления ионного тока, так и локально, в зоне регистрации сигнала появления пламени у электрода датчика. Показано, что у удаленного от свечи зажигания датчика ионизации выше стабильность сигнала и его легче интерпретировать в характеристики скорости тепловыделения.

7. Показана возможность оценки эффективности процесса сгорания по сигналам с датчиков ионизации, позволяющих не только оценивать коэффициент избытка топлива, состав газового топлива, но и скорость тепловыделения, а, следовательно, и эффективность протекания процесса сгорания, что показывает широкие возможности для регулирования рабочего процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. E.A. VanDyne, C.L. Burcmyer, A.M. Wahl and A.E. Funaioli, “Misfire Detection from Ionization Feedback Utilizing the Smartfire Plazma Ignition Tecnology,” SAE 2000-01-1377.
2. A. Vressner, “Studies on the load range of an HCCI engine using in-cylinder pressure, ion current and optical diagnostics,” Doctoral thesis. 2007.
3. H. Mott-Smith and I. Langmuir, Phys. Rev. 1926. V. 28. № 5. P. 727.
4. H.J. Eindinder, The Journal of Chem. Phys. V. 26. № 4. 1937.
5. K.E. Shuler and J. Weber, Journal of Chem.Phys. V. 22. № 3. 1934.
6. H. F. Calcote and I. King, “Studies of ionization in flames by means of langmuir probes,” Technical report. 1955.
7. D. Upadhay and G. Rizzoni, “AFR Control on a Single Cylinder Engine Uzing the Ionizaition Current,” SAE 980203
8. M. Hellring, T. Munter, T. Rögnavaldsson, N. Wikström, C. Carlsson, M. Larsson and J. Nytomt, “Robust AFR Estimation Using Ion Current and Neural Networks,” SAE 1999-01-1161.
9. A. Saitzkoff, R. Reinmann, F. Mauss M. and Glavmo, “In-Cylinder Pressure Measurements Using the Sparg Plug as an Ionization Sensor,” SAE 970857.
- 10.J. Auzins, H. Johansson and J. Nytomt, “Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock, and Engine Control,” SAE 950004.
- 11.A. Vressner, P. Strundh, A. Hultqvist, P. Tuntstal and B. Johansson, “Multiple Point Ion Current Diagnostics in an HCCI Engine,” SAE 2004-01-0934.
- 12.P. Strandh, M. Christensen and A. Vressner, “Ion current sensing for HCCI combustion feedback,” SAE Paper. 2003. № 2003-01-3216.
- 13.M. Bruce, “Estimation of the EGR rate in a GDI engine working in stratified mode using the ionization current,” Doctoral thesis. 2000.
- 14.A.G. Egorov, K.V. Migalin and A.P. Shaikin, “Experimental study of ignition and stabilization of powder aluminum flame in combustion chamber

- with sudden expansion,” Soviet Aeronautics (English translation of Izvestiya VUZ, Aviatsionnaya Tekhnika). 1989.
- 15.H. Wilstermann, A. Greiner, P. Hohner, R. Kemmler, R.R. Maly and J. Shenk, “Ignition System Integrated AC Ion Current Sensing for Robust and Reliable Online Engine Control,” SAE 2000-01-0553.
 - 16.L. Eriksson, “Spark Advance Modeling and Control,” Doctoral thesis. 1999.
 - 17.G. Malaczynski, G. Roth and D. Johnson, "Ion-Sense-Based Real-Time Combustion Sensing for Closed Loop Engine Control," SAE Int. J. Engines 6(1):2013, doi:10.4271/2013-01-0354.
 - 18.I. Andersson, “Cylinder Pressure and ionization current modeling for spark ignited engines,” Doctoral thesis. 2002.
 - 19.N. Henein, W. Bryzik and A. Gupta, “Characteristics of ion current signals in compression ignition and spark ignition engines,” SAE Int. № 3(1). 2010. P. 260-281.
 - 20.D. Panousakis, A. Gazis, J. Patterson and R. Chen, “Analysis of SI combustion diagnostics method using ion-current sensing techniques,” SAE Paper. 2006. № 2006-01-1345
 - 21.M.M. Krishtal, A.V. Polunin, P.V. Ivashin, E.D. Borgardt and I.S. Yasnikov, “Changes in the phase composition of oxide layers produced by microarc oxidation on Al–Si and Mg alloys induced by additions of SiO₂ nanoparticles to the electrolyte,” Doklady Physical Chemistry. 2016
 - 22.N.M. Smolenskaya and N.V. Korneev, “Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel,” IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.
 - 23.N.M. Smolenskaya and V.V. Smolenskii, “Modelling the average velocity of propagation of the flame front in a gasoline engine with hydrogen additives,” IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 115 (2018) 012016 doi: 10.1088/1755-1315/115/1/012016.

- 24.N.M. Smolenskaya, V.V. Smolenskii and N.V. Korneev, "Increase in the thermodynamic efficiency of the working process of spark-ignited engines on natural gas with the addition of hydrogen," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 121 (2018) 052009 doi :10.1088/1755-1315/121/5/052009.
- 25.N.M. Smolenskaya, V.V. Smolenskii and I. Bobrovskij, "Research of polytropic exponent changing for influence evaluation of actual mixture composition on hydrocarbons concentration decreasing on deep throttling operation," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 50 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/50/1/012016.
- 26.N.M. Smolenskaya, "The electrical conductivity of the flame front, as a characteristic of the rate of heat release and composition of gas fuel in SI engines," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 115 (2018) 012039 doi: 10.1088/1755-1315/115/1/012039.
- 27.A.P. Shaikin and I.R. Galiev, "Use of Chemi-Ionization to Calculate Temperature of Hydrocarbon Flame," Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2018. T. 63. № 4. p. 612-614.
- 28.A.P. Shaikin and I.R. Galiev, "On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings," Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2016. T. 61. № 8. p. 1206-1208.
- 29.Z. Gao, X. Wu, H. Gao and B. Liu, "Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gasehydrogen blends with BSS de-noising method," International journal of hydrogen energy. 2010. № 35. P. 12918-12929.
- 30.M. Hellring and U. Holmberg, "An Ion current based peak-finding algorithm for pressure peak position estimation," SAE Inc. 1998. № 00FL-587
- 31.Z. Gao, X. Wu, C. Man and X. Meng, "The relationship between ion current and temperature at the electrode gap," Applied thermal engineering. № 33. 2012.

- 32.A. Vressner, A. Hultqvist, P. Tunestal and B. Johansson, "Fuel effects on ion current in an HCCI engine," SAE Paper. 2005. № 2005-01-2093.
- 33.L. Winkler, N. Hegman, C. Raffay and A. Palotas, "Ion current measurements in natural gas flames," European combustion meeting. 2007.
- 34.M. Hellring, T. Munter, T. Rögnvaldsson, N. Wikström, C. Carlsson, M Larsson and J. Nytomt. Robust AFR Estimation Using Ion Current and Neural Networks. SAE 1999-01-1161
- 35.A. Saitzkoff, R. Reinmann, F. Mauss and M. Glavmo In-Cylinder Pressure Measurements Using the Sparg Plug as an Ionization Sensor. SAE 970857
- 36.E.A. VanDyne, C.L. Burcmyer, A.M. Wahl and A.E. Funaioli Misfire Detection from Ionization Feedback Utilizing the Smartfire Plazma Ignition Tecnology. SAE 2000-01-1377
- 37.Auzins J., H. Johansson and J. Nytomt Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock, and Engine Control. SAE 950004
- 38.Smolenskaya N.M. and Korneev N.V. Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.
- 39.Вибе И.И., Тепловой расчёт двигателей внутреннего сгорания[Текст] / И.И. Вибе // Челябинск.: Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, 1972. - с.282
- 40.Улыбышев, К.Е. Расчёт влияния постоянного электрического поля на газодинамику и эмиссию окислов азота в ламинарном диффузионном пламени[Текст] / К.Е. Улыбышев // МЖГ. №1, 2000. - С.55-71.
- 41.Проскурин, В.Ф. Цепно-тепловой взрыв и степень ионизации водородовоздушного пламени [Текст] / В.Ф.Проскурин, П.Г. Бережко, Е.Н. Николаев, В.Н. Тараканов, П.Е. Половинкин, А.Г. Лещинская //Физика горения и взрыва. 2005. № 1. С.15-23.
- 42.Сеначин, П.К. Моделирование процесса горения гомогенной смеси в двигателе с искровым зажиганием [Текст] / П.К.Сеначин, М.А.Ильина,

- Д.Д.Матиевский, М.Ю. Сverdlov //Тез. XII симпозиума по горению и взрыву, 11-15 сентября 2000 г. Черногловка: РАН, 2000.-ч.3.-с.155-157.
- 43.Daniels, C. F. The comparison of mass fraction burned obtained from the cylinder pressure signal and spark plug ion signal [Text] / SAE paper № 980140, 1998.
- 44.Eriksson, L. Requirements for and a systematic method for identifying heat release model parameters. Modeling of SI and Diesel Engines [Text] / SAE Paper № 980626, 1998.
- 45.Franke, A. Employing an ionization sensor for combustion diagnostics in a lean burn natural gas engine [Text] / A.Franke, P.Einewall, B.Johansson, R.Reinmann // SAE paper № 2001-01-0992, 2001.
- 46.Frenklach, M. GRI-Mech/ M.Frenklach, T.Bowman, G.Smith, B.Gardiner // entnommen am 18.06.2009, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/. 2009.
- 47.Grill, M. Objektorientierte Prozessrechnung von Verbrennungsmotoren [Текст] / M.Grill // Stuttgart, Universität, Dissertation. 2006a.
- 48.Gülдер, Ö. L. Turbulent Premixed Combustion Modelling using Fractal Geometry [Текст] / Ö.L. Gülder // in: 23. Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute. 1990.
- 49.Herdin, G. Emissionsproblematik bei Biogasmotoren [Текст] / G.Herdin // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007.
- 50.Heywood, J. B. Fluid Motion Within the Cylinder of Internal Combustion Engines - The 1986 Freeman Scholar Lecture [Текст] / J. B.Heywood // Journal of Fluids Engineering Vol. 109 / 3. 1987.
- 51.Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals [Текст] / J. B.Heywood // New York: McGraw-Hill. 1988.
- 52.Hiroyasu, H. Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber [Текст] / H.Hiroyasu, T.Kodata // SAE Paper 740715. 1974.
- 53.Huiming, Z. Investigation on the Combustion Characteristics of the Compression Ignition Divided Chamber Combustion System of the Natural

- Gas Engine[Текст]/ Z.Huiming,Z.Defu, Z.Qingping // in: CIMAC Congress. Wien. 2007.
- 54.Jobst, J. Simulation von Zündverzug, Brennrate und NO_x-Bildung für direktgezündete Gasmotoren[Текст] / J. Jobst, F. Chmela, A. Wimmer // in: 1. TagungMotorprozesssimulation und Aufladung. Berlin. 2005.
- 55.John, A. Entwicklung und Erprobung eines zweistufigen Impaktors zur Messung alveolengängiger Quarzfeinstaubemissionen und Durchführung von Validierungsmessungen[Текст] / A. John, H. Kaminski, T. Kuhlbusch // Duisburg, IUTA e.V., Bericht. 2004.
- 56.Kettner, M. Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Optimierung der Entflammung von mageren Gemischen bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung[Текст] / M. Kettner // Karlsruhe, Universität, Dissertation. 2006.
- 57.Klimstra, J. The road to obtain the ultimate performance of gas engines - opportunities and challenges[Текст]/ J.Klimstra// in: 5. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau. 2007.
- 58.Koch, T. Numerischer Beitrag zur Charakterisierung und Vorausberechnung der Gemischbildung und Verbrennung in einem direkteinspritzenden, strahlgeführten Ottomotor[Текст] / T. Koch // Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation. 2002.
- 59.Kogler, G.Potential of HCCI for large natural gas fueled engines[Текст]/ G.Kogler, A.Wimmer // in: CIMAC Congress. Wien. 2007.
- 60.Kolb, T.Experimentelle und theoretische Untersuchung zur Minderung der NO_x-Emission technischer Feuerungen durch gestufte Verbrennungsführung[Текст] / T. Kolb // Karlsruhe. TechnischeHochschule, Dissertation. 1990.
- 61.Kozuch, P. Ein phänomenologisches Modell zur kombinierten Stickoxid- und Rußberechnung bei direkteinspritzenden Dieselmotoren[Текст] / P. Kozuch // Stuttgart, Universität, Dissertation. 2004.

62. Kuhlmann, R. M. V. Improvement of a Model for Calculation of Oxides of Nitrogen Emissions from Spark Ignition Engines [Текст] / R. M. V. Kuhlmann, J. R. Sodre // SAE-Paper 2004-01-3001. 2004.
63. Lämmle, Ch. Numerical and Experimental Study of Flame Propagation and Knock in a Compressed Natural Gas Engine [Текст] / Ch. Lämmle // Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation. 2005.
64. Liao, S. Y. Determination of laminar burning velocities for natural gas [Текст] / S. Y. Liao, D. M. Jiang, Q. Cheng // Fuel 83 (2004). Elsevier. Science Direct. 2004.
65. Magnussen, B. F. On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with special emphasis on Soot formation and Combustion [Текст] / B. F. Magnussen, B. H. Hjertager // in: 16. Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. Pittsburgh. 1976.
66. Merker, G. Technische Verbrennung - Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse [Текст] / G. Merker, Ch. Schwarz // Stuttgart: Teubner. 2001.
67. Mittermayer, F. Periodisch beladbare Hochdruckzelle zur Untersuchung der Verbrennung in vorkammergezündeten Großgasmotoren [Текст] / F. Mittermayer, C. Heinz, T. Sattelmayer, A. Hanenkamp, I. Wilke // in: Berichte zur Energie- und Verfahrenstechnik, 9. Tagung Motorische Verbrennung, Heft 9.1. München. 2009.
68. Noske, G. Ein quasidimensionales Modell zur Beschreibung des ottomotorischen Verbrennungsablaufes [Текст] / G. Noske // Düsseldorf: VDI Verlag. 1988.