МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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)
Поршневые и комбинированные двигатели
(направленность (профиль)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Выявление возможностей управления ДВС с искровым зажиганием по электропроводности пламени для повышения эффективности процесса сгорания

Студент(ка) Даниил Юрьевич Давыдов _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Научный руководитель В.В. Смоленский _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Руководитель магистерской программы д.т.н., профессор А.П. Шайкин _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

«_____» июня 2018 г.

Допустить к защите

Зав. кафедрой «ЭМиСУ» к.т.н., доцент Д.А. Павлов _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« _____ » июня 2018 г.

Тольятти 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение…… 4

ГЛАВА 1 Изучение литературы по особенностям связанным с применением явления электропроводности пламени в ДВС …… 6

1.1 Контроль и регулирование процесса сгорания по ионному току полученному со свечи зажигания …… 6

1.2 Особенности исследования и управления процессом сгорания в поршневых ДВС с искровым зажиганием …… 11

1.3 Подходы к системам контроля и управления процессом сгорания в ДВС …… 16

1.4 Свойства ионизационного тока …… 17

1.5 Электропроводность пламени как метод изучения процесса сгорания в поршневых ДВС искровым зажиганием …… 25

1.6 Влияние температуры сгорания на концентрацию окислов азота NO_x в отработавших газах ДВС …… 16

1.7 Модели оценки концентрации оксидов азота в трудах отечественных и зарубежных исследователей …… 17

1.8 Выводы по Главе 1…… 25

ГЛАВА 2 Описание экспериментального оборудования и план проведения экспериментальных исследований …… 34

2.1 Экспериментальная установка …… 34

2.2 Описание схемы измерения и записи показаний ИД…… 36

2.3 Программа проведения испытаний …… 38

ГЛАВА 3 Оценка результатов проведенных стендовых исследований по теме диссертационного исследования и их анализ …… 39

3.1 Использование электропроводности пламени для определения средних скоростей и продолжительности процесса сгорания …… 39

3.2 Электропроводность пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха …… 45

ГЛАВА 4 Оценка возможностей регулирования процесса сгорания по датчикам ионизации …… 49
4.1 Контроль и регулирование процесса сгорания по ионному току в заключительной фазе сгорания …… 49
4.2 Взаимосвязь электропроводности пламени с составом смеси, режимами работы двигателя (ε, n) и качеством ТВС …… 58
4.3 Взаимосвязь электропроводности пламени со средней скоростью распространения пламени …… 59
4.4 Взаимосвязь электропроводности пламени с эффективностью работы бензинового двигателя …… 61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 66
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ…… 67

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Анализ, существующих и разрабатываемых систем контроля и управления работой двигателя показал, что наиболее перспективным, простым и относительно дешевым является система, основанная на контроле и управлении процессом сгорания ТВС, в частности на основе явления электропроводности в пламени.

Предлагается подтверждение гипотезы о возможности получения значительного объема информации о процессе сгорания в условиях ДВС, практически безинерционно с помощью явлении электропроводности пламени углеводородных топлив и возможности создания систем управления сгоранием топлива в ДВС с искровым зажиганием.

Целью работы является выявление возможностей управления ДВС с искровым зажиганием по электропроводности пламени для повышения эффективности процесса сгорания.

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

1. обобщить результаты известных экспериментальных исследований и сопоставить их с возможностями регулирования рабочим процессом по электропроводности пламени.
2. выявить возможности управления ДВС с искровым зажиганием по электропроводности пламени для повышения эффективности процесса сгорания.

Объект исследования: процесс сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием.

Предмет исследования: электропроводность пламени как отражение параметров работы двигателя.

Методы исследования. Метод экспериментального исследования на одноцилиндровой установке и метод статистической обработки результатов эксперимента.

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

Научная новизна исследования

Выявлены возможности управления ДВС с искровым зажиганием по электропроводности пламени для повышения эффективности процесса сгорания.

Практическая значимость работы:

Обобщены результаты экспериментальных исследований и сопоставить их с возможностями регулирования рабочим процессом по электропроводности пламени.

На защиту выносятся:

1. обобщение результатов известных экспериментальных исследований и сопоставить их с возможностями регулирования рабочим процессом по электропроводности пламени;
2. выявленные возможности управления ДВС с искровым зажиганием по электропроводности пламени для повышения эффективности процесса сгорания.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференции МНПК Вопросы образования и науки, г. Тамбов в 2017 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 печатных работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 31 наименования. Работа изложена на 70 страницах машинописного текста, иллюстрированного 1 таблицей и 36 рисунками.

ГЛАВА 1 Изучение литературы по особенностям связанным с применением явления электропроводности пламени в ДВС

1.1 Контроль и регулирование процесса сгорания по ионному току полученному со свечи зажигания

Характеристики искрового разряда во многом определяют эффективность двигателей с искровым зажиганием путем поочередного сгорания по отношению к движению поршня. Современные контроллеры в ДВС с искровым зажиганием представляют собой системы с разомкнутым контуром, которые измеряют параметры, которые влияют на настройку искрового разряда и компенсируют их эффекты. Несколько параметров влияют на наилучшую настройку искрового разряда, но было бы слишком дорого измерять и учитывать все из них. Это приводит к калибровочным таблицам, которые являются компромиссом, поскольку они должен гарантировать хорошую производительность по всему диапазону всех неизмеримых параметров системы управления. Схема замкнутого контура вместо этого измеряет результат фактического ускорения искры и поддерживает оптимальную настройку искрового хода при наличии помех. Чтобы охватить эту область, необходимо решить два вопроса: как определить оптимальность искрового разряда и как ее можно измерить?

Одним из перспективных направлений по управлению рабочим процессом является измерение тока ионизации, который использует свечу зажигания в качестве датчика, когда он не используется для зажигания. Это прямое измерение в цилиндре, которое содержит информацию об сгорании. Представлен новый подход к контролю за искрами, который использует ионизационный ток как воспринимаемую переменную. Схема управления обратной связью тесно связана с схемами, основанными на измерениях давления в цилиндре, которые ранее сообщали о хороших результатах. Ключевой идеей в этом подходе является подгонка модели к измеренному

сигналу тока ионизации и извлечение информации о позиции пикового давления из параметров модели. Стратегия управления проверяется на двигателе с искровым зажиганием, демонстрируя, что контроллер, основанный на интерпретации тока ионизации, может контролировать положение пикового давления в желаемых положениях. Контроллер поддерживает оптимальное ускорение искры в различных условиях и при наличии внешних возмущений, таких как влажность воздуха.

Ток ионизации, измеренный с помощью свечи зажигания в качестве датчика, является прямым измерением в камере сгорания. Он уже используется в производстве автомобилей для обнаружения стука, пропусков зажигания и для измерения фазы кулачка [1]. Поэтому для включения системы искрового ускорения на основе ионизационного тока требуется только дополнительная интерпретация сигнала в электронном блоке управления двигателем (ECU). Ток богат информацией о сжигании, но он также сложный с тремя характерными фазами, которые смешиваются сложными способами. Одна из фаз содержит информацию о давлении в цилиндре, что хорошо, поскольку датчик давления, который может выдерживать высокие давления и температуры в процессе горения, является дорогостоящим и еще не доказал свою эффективность.

В двигателях с искровым зажиганием смесь топлива и воздуха готовится заранее, и смесь зажигается искровым разрядом. Искра инициирует небольшое пламенное ядро, которое превращается в турбулентное пламя, которое распространяется через цилиндр. Сжигание увеличивает температуру и давление, которые создают работу на поршне. Основная цель искры состоит в том, чтобы зажечь топливо и инициировать стабильное сгорание в таком положении, которое отвечает требованиям максимальной эффективности, выполнению требований к выбросам и предотвращению разрушения двигателя. Требования иногда противоречат друг другу; например при высоких нагрузках на двигатель, время зажигания для максимальной эффективности должно быть отменено в целях

предотвращения разрушения двигателя с помощью стука двигателя. При зажигании контролируются два основных параметра: энергия зажигания и время зажигания. Контроль за энергией зажигания является важной темой для обеспечения инициирования горения, но основное внимание в этом тезисе уделяется времени зажигания, которое максимизирует эффективность двигателя.

Сама синхронизация зажигания влияет на почти все выходы двигателя и имеет важное значение для эффективности, управляемости и выбросов. Сосредоточив внимание на эффективности двигателя, оптимальное время зажигания для обычного двигателя SI определяется как: время зажигания, которое при заданном рабочем состоянии двигателя максимизирует работу, производимую в течение цикла. Этот выбор определения сужает проблему до определения только времени зажигания. Простая мотивация для определения заключается в том, что когда произведенная работа максимизируется для фиксированной геометрии двигателя и рабочего состояния с постоянной скоростью, постоянным количеством топлива и постоянным соотношением воздух / топливо, тогда он дает наилучшую экономию топлива. Время зажигания, которое дает максимальный тормозной момент, называется максимальным временем крутящего момента. Время, которое отклоняется от времени MBT, снижает выходной крутящий момент.

В современных производственных системах время зажигания контролируется с использованием схем с разомкнутым контуром, которые основаны на справочных таблицах. Таблицы поиска определяются с помощью обширных калибровочных экспериментов в динамометрах двигателя или шасси. Согласно Хейвуду [2] процедура калибровки обычно следует этим рекомендациям: сначала определяется крутящий момент при MBT. Затем время зажигания замедляется по направлению к BMT до тех пор, пока крутящий момент не будет уменьшен примерно на 1% ниже максимального и это значение будет использовано. Для этого есть три причины: во-первых, легче определить эту позицию, поскольку крутящий

момент в зависимости от времени зажигания является плоским при оптимальном. Во-вторых, при немного отстающем графике увеличивается разность условий детонации. В-третьих, образование NOx уменьшается. Калиброванный график хранится в справочной таблице, охватывающей рабочий диапазон двигателя, и коэффициенты компенсации добавляются и используются во время, например, холодного запуска и холостого хода. Оптимальное время зажигания зависит от того, как пламя распространяется через камеру сгорания, и потери, такие как передача тепла на стенки и поршень, втекают в расщелины и выходят из него, а поршень продувается. Распространение пламени, в свою очередь, зависит от многих параметров, таких как частота вращения двигателя, нагрузка на двигатель, температура двигателя, температура всасываемого воздуха, качество топлива, соотношение воздух / топливо и влажность, а также некоторые из них. Таким образом, оптимальное время зажигания зависит от многих параметров двигателя. Некоторые из параметров, которые измеряются и учитываются в современных системах, это: частота вращения двигателя, нагрузка на двигатель, температура охлаждающей жидкости и температура всасываемого воздуха [3]. Измерять и учитывать все параметры, влияющие на время зажигания, было бы очень дорогостоящим и трудоемким. Калибровочная схема должна гарантировать хорошую производительность по диапазону не измеряемых параметров и часто выбирается как консервативная, поэтому она не оптимальна при изменении неизмеренных параметров. С другой стороны, схема обратной связи, которая измеряет результат зажигания, а не измеряет и учитывает вещи, которые влияют на него, может гарантировать хорошую производительность по всему диапазону неизмеримых параметров, повысить эффективность и дополнительно уменьшить калибровочные усилия и требования.

Ток ионизации, измеренный с помощью свечи зажигания в качестве датчика, также является прямым измерением в камере сгорания. Метод измерения заключается в применении смещения постоянного тока к свече

зажигания, когда он не используется для зажигания и измеряет ток, протекающий через цепь. Ток богат информацией о сжигании, но он также сложный с тремя характерными фазами, которые смешиваются сложными способами. Механизмы, которые вносят вклад в ионы при сгорании, были исследованы, но их относительная важность в качестве источника тока еще не полностью понята. Следующее описание трех фаз дает картину основных процессов: первая фаза, фаза зажигания, зависит от самого зажигания и схемы зажигания; На второй фазе фаза фронта пламени оказывают влияние ионы, которые генерируются на фронте пламени или рядом с ним; На третьей фазе, после фаз пламени, влияет давление через его влияние на температуру. Третий этап, который содержит информацию о следе давления, представляет интерес для контроля зажигания. Ток ионизации уже используется в производстве автомобилей для обнаружения детонации, неправильного срабатывания и для измерения кулачковой фазы [1]. Поэтому для включения системы искрового хода, основанной на ионизационном токе, требуется только дополнительная интерпретация сигнала в электронном блоке управления двигателем.

Подход, использованный здесь, заключается в том, чтобы оценить положение пикового давления от сигнала ионного тока и использовать его для управления ускорением зажигания. В нижеследующих пунктах излагаются те исследования, которые были исследованы, и результаты, представленные в этом тезисе. Следует отметить, что метод оценки профиля сжигаемой фракции масс был представлен в работе Дэниелса [5]. Первая публикация показывает, что положение пикового давления можно оценить по трассе ионного тока с использованием простой модели [6]. Модель в какой-то степени физически оправдана. Показано, что простой поиск пика невозможен из-за сложного появления сигнала ионного тока. Вторая публикация показывает, что алгоритм был разработан и реализован для оценки ППС в реальном времени [7]. Прототипная реализация алгоритма выполняется на ПК. В публикации 3 показана производительность

контроллера для двигателя в тестовом стенде. Эксперименты показывают, что время зажигания успешно контролируется, и они определяют время отклика шага [8]. Публикация 5 показывает, что схема управления, основанная на ионизационном токе, может справляться с нарушениями окружающей среды и поддерживать оптимальный график улучшения искры даже в изменяющихся условиях [9]. В публикации 4 также показано, что впрыск воды в сочетании с регулятором искрового хода с замкнутым контуром может увеличить эффективность двигателя на несколько процентов [10]. Результаты также показывают, что только впрыск воды не улучшает производительность, но комбинация с контроллером замкнутого контура.

1.2 Особенности исследования и управления процессом сгорания в поршневых ДВС с искровым зажиганием

Системы управления двигателем (EMS) нуждаются в обратной связи по характеристикам сгорания для оптимального управления двигателями внутреннего сгорания. Ионное зондирование является одним из наиболее эффективных способов контроля события горения в искровом двигателе, но все же физические процессы до конца не поняты. Целью здесь является исследование моделей ионизации и установление связи с давлением и температурой горения. Представлена модель тепловой части ионизационного сигнала, которая связывает ионизационный ток с давлением и температурой цилиндра. Одной из сильных сторон модели является то, что после калибровки имеет только два свободных параметра, угол ожога и начальную температуру ядра. При подгонке модели к цилиндру можно оценить давление и температуру в баллоне. Модель параметризованного тока ионизации состоит из четырех частей; модель тепловой ионизации, модель образования оксида азота, модель температуры горения и функция давления в цилиндре. Функция давления является эмпирической функцией, где параметры имеют физический смысл, а функция имеет основные

характеристики решения уравнений давления в цилиндре. Чувствительность модели ионизационного тока к температуре и содержанию оксида азота заключается в понимании необходимости сложности подмодели. Два основных результата заключаются в том, что сама модель давления хорошо отражает поведение давления в цилиндре и что модель параметризованного тока ионизации может использоваться с ионизационным током в качестве входного сигнала и работать как датчик давления виртуального цилиндра и инструмент для анализа горения. Эта модель ионизационного тока не только описывает связь между ионизационным током и процессом горения, но также предлагает новые возможности для EMS управлять двигателем внутреннего сгорания.

При проектировании современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) необходимо учитывать высокие требования, предъявляемые к их токсичности и экономичности при этом без существенного снижения мощности. В связи с чем, требуется учет и детальный анализ самого сложного и хаотического процесса происходящего в двигателе, самого процесса сгорания, который определяет мощностные, экономические и экологические показатели двигателя.

Для начала рассмотрим, процесс горения углеводородного топлива. Горение это процесс окисления углеводородов, который проходит по разветвленному цепочно-тепловому механизму [1]. Процесс сгорания в двигателях с искровым зажиганием происходит в тонком фронте пламени, разделяющем продукты сгорания от несгоревшей топливно-воздушной смеси (ТВС). Где в течение нескольких долей миллисекунды происходит более 400 химических реакций, как в прямом, так и в обратном направлении, которые во многом зависят от локальной температуры, давления и химического состава топлива, который не одинаков даже для топлив одной марки. При этом на процесс распространения пламени также огромное влияние оказывает состояние потока ТВС. Причем если поток является установившимся, т.е. ламинарным, то скорость распространения фронта

пламени и интенсивность протекания в нем химических реакций ниже, чем для хаотического, неустановившегося (турбулентного) потока. Помимо выше указанного на процесс сгорания большое влияние оказывают такие конструкционные и регулировочные факторы как, степень сжатия, форма камеры сгорания, угол опережения зажигания, характеристики системы зажигания и многие другие.

Таким образом, при моделировании процесса сгорания для вновь проектируемого двигателя возникает масса трудностей связанных с хаотичностью, нестационарностью и нелинейностью моделируемого процесса, который можно описать только комплексно при совместном влиянии всех варьируемых параметров, т.е. без разбиения на отдельные составляющие. Так как на настоящее время невозможно с достаточной точностью смоделировать протекание процесса горения в цилиндре двигателя с учетом всех параметров системы. Поэтому для создания нового двигателя необходимо создание создания экспериментального образца с дальнейшим исследованием процесса сгорания на нем. Для этого при исследованиях процесса сгорания в цилиндре поршневого ДВС всегда имеется тенденция визуализации и количественного описания характеристик процесса сгорания. Что в свою очередь значительно удорожает и усложняет проектирование современных двигателей.

Однако, даже при всех разнообразных способах и методах исследования процесса сгорания на натурном образце, основанных на различных физических явлениях, применяемых в современных исследованиях. Такие как методы спектрального анализа, лазерной диагностики, явление электропроводности пламени и измерения давления в цилиндре двигателя, с последующим математическим моделированием процесса сгорания, возможно лишь с достаточной достоверностью для данной конструкции и вида топлива [2]. И очень тяжело распространять на другие конструкции, причем всегда возникает много трудностей при

разработке системы электронного контроля и управления процессом сгорания при эксплуатации.

Основными трудностями, с которыми сталкиваются при создании эффективных систем контроля и управления процессом сгорания, является малая продолжительность по времени регулируемого процесса, его хаотичность, открытость, неравновестность, и влияние большого количества различных факторов. Современные системы контроля работают по принципу черного ящика, т.е. есть входной сигнал (например, угол опережения зажигания) и эффективность регулирования оценивают по изменению выходного сигнала (например, мощности при отсутствии детонации), при этом, как протекает сам процесс сгорания, никак не оценивается. Что приводит к значительной инерционности и следовательно к снижению эффективности регулирования, так как работа двигателя в городских условиях большую часть времени проходит на переменных режимах. Где для эффективной работы двигателя требуется адекватное и своевременное изменение регулировочных характеристик.

Существующие методы внутрицилиндрового исследования процесса сгорания, описанные выше, могли бы применяться в качестве основных элементов в системах контроля и регулирования процесса сгорания, если бы не их высокая стоимость и сложность. Исключением можно считать только датчики, работающие на основе явления ионизации в пламени углеводородных топлив [3]. Такие датчики являются безинерциоными, т.е. мгновенно передают сигнал в бортовой компьютер. Также у таких датчиков низкая стоимость, так как в качестве датчика ионизации можно использовать металлическую проволочку диаметром до 1 мм к которой подведен электрический ток, а в качестве массы используется корпус, и сигнал падения напряжения из-за пробоя пламени подается на бортовой компьютер. Современные исследования показали возможность оценки температуры и давления в процессе сгорания, и, следовательно, токсичности по оксидам азота, при использовании в качестве датчика ионизации свечи зажигания

(уже имеются опытные образцы) [4]. А также датчики специально расположенные по периметру камеры сгорания, позволяют оценить скорость распространения пламени и токсичность по несгоревшим углеводородам (исследования активно продолжаются) [5]. Тем самым применение этих двух схем позволяет безинерционо практически полностью контролировать весь процесс сгорания. Помимо этого применение данного метода позволит в значительной мере снизить неравномерность протекания рабочего процесса по цилиндрам двигателя, осуществляя их индивидуальную регулировку, тем самым значительно повысив мощность и ресурс двигателя.

Автором представленной работы проведен анализ особенностей исследования и управления процесса сгорания в поршневых ДВС с искровым зажиганием, в результате чего получены следующие выводы:

1. Процесс сгорания необходимо рассматривать как целостностную, открытою, неравновесную систему со всеми присущими ей закономерностями и особенностями. То есть, нельзя получить достоверную информацию о процессе исследуя лишь отдельные его часть в отрыве от системы.

2. Математическое моделирование процесса сгорания с достаточной точностью на стадии проектирования, без создания натурных образцов, возможно, лишь при наличии целостного понимания поведения системы.

3. Качественный контроль и регулирование процесса сгорания на двигателе, позволяющий повысить экономические и экологические показатели работы двигателя, возможен только при непосредственном анализе протекания процесса сгорания.

Наиболее перспективный способ безинерционного контроля и регулирования процесса сгорания, оценивающим непосредственно сам процесс, является применением датчиков ионизации установленных непосредственно в камеру сгорания.

1.3 Подходы к системам контроля и управления процессом сгорания в ДВС

Двигатели внутреннего сгорания стали основным источником энергии на протяжении всей истории наземных транспортных средств. С нефтяного кризиса в 1970-х годах основное внимание разработчиков двигателей привело к экономии топлива и сокращению выбросов. Внедрение электронных систем зажигания и впрыска топлива в 1980-х годах дало инженерам больше возможностей, чем управление двигателем. Ограничение в развитии управления двигателем читается в доступной информации о контролируемом процессе; сжигание. Экономия топлива стимулирует развитие эффективности двигателя. Это включает оптимальное время зажигания и количество топлива для данного рабочего состояния. Сокращение выбросов приводит к разработке контроля соотношения воздух-топливо, дезинфекции пропусков зажигания и контроля продувки. Кислородные датчики, установленные в выхлопной трубе, обеспечивают регулирование соотношения воздух-топливо с замкнутым контуром и пьезоэлектрические датчики детонации, установленные на блоке двигателя. Для контроля горения существуют три метода;

- измерение давления в цилиндре
- измерение ионизационного тока
- оптические приборы

Оптические методы включают в себя телевизионные камеры или лазеры, предназначенные для прозрачной части в головке блока или стене. Это оборудование дорого и подходит только для лабораторных работ. Датчики давления цилиндра могут быть установлены в головке цилиндра для измерения давления при горении. Большинство часто используемых мер качества горения связаны с давлением в баллоне. Датчик давления в настоящее время используется только в лабораторных условиях из-за стоимости и продолжительности жизни, но достигнуты успехи в поиске

датчика, подходящего для установки в будущих системах управления двигателем (EMS). Единственным из трех упомянутых методов измерения, которые сегодня используются в производстве EMS, является датчик ионизационного тока. Для двигателей с искровым зажиганием свеча зажигания используется как датчик вместе с некоторой измерительной электроникой, добавленной в систему зажигания. Это относительно дешевый метод мониторинга горения, а другие датчики могут быть заменены. Использование ионного зондирования в современном EMS ограничено детонацией и пропуском зажигания, но разработчики двигателей начинают видеть необходимость в других данных о сжигании, таких как соотношение воздух-топливо, крутящий момент, стабильность сгорания и расположение пикового давления. Исследования в этой области направлены на поиск запрашиваемой информации в ионизационном токе, и результаты являются многообещающими. Тем не менее, осталось много работы, чтобы объяснить и понять информацию, скрытую в ионизационном токе.

1.4 Свойства ионизационного тока

Сжигание в искровом зажигательном двигателе (SI) обычно начинается с искрового разряда в свече зажигания. Пламя развивается и перемещается от места свечи зажигания к стенкам цилиндра, поскольку оно потребляет воздушно-топливную смесь. Химические реакции и повышенная температура на фронте пламени создают свободные заряды в результате различных процессов ионизации. Количество бесплатных зарядов невелико, но измеримо (Reinmann, 1998). Прикладывая напряжение к искровому промежутку после исчезновения искры, свободный заряд образует ток, ток ионизации или ионный ток.

На рисунок 1.1 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 Jon измеряется через резистор R. Ионное зондирование в последние годы стало горячей темой в отношении методов измерения и возможных применений (Nielsen and Eriksson, 1998; Asano et al., 1998; Auzins et al., 1995; Balles et al., 1998; Collings et al., 1991; Daniels, 1998; Förster et al., 1999; Hellring et al., 1999; Lee and Pyko, 1995; Shimasaki et al.., 1993; Andersson and Eriksson, 2000). Более теоретические исследования, касающиеся физико-химического моделирования, были выполнены и опубликованы Saitzkoff et al. (1997), Reinmann et al. (1998) и Wilstermann (1999). Ток ионизации имеет характерную форму. Одно из предложений разделяет ионный ток на три части: фазу зажигания, фазу фронта пламени и фазу после пламени (Eriksson et al., 1996; Nielsen and Eriksson, 1998).

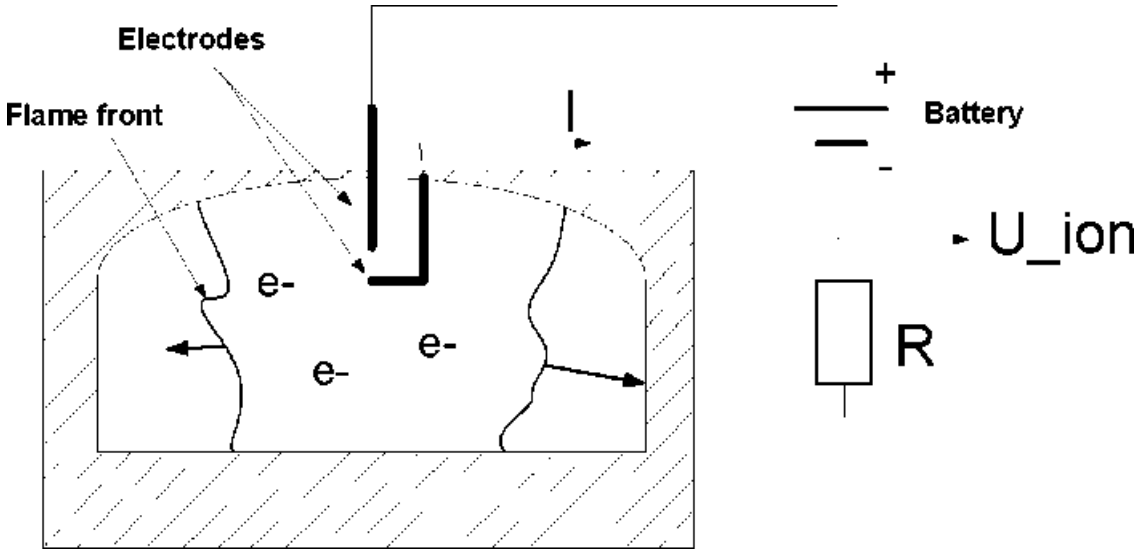

Рисунок 1.1 - Ионная система восприятия

На рисунке 1.2 показана типичная трасса ионного тока от двигателя с впрыском топлива с двигателем с индуктивной системой зажигания. Фаза зажигания начинается с зарядки катушки зажигания и заканчивается кольцом катушки после искры. Фаза пламени отражает развитие раннего пламени в искровом промежутке, а фаза после пламени появляется в сгоревших газах за фронтом пламени. Фаза зажигания часто не учитывается при обсуждении

ионизационных токов. Это оставляет текущую форму с типично двумя пиками. Фаза фронта пламени часто упоминается как первый пик или пик пламени. Фаза после пламени была названа вторым пиком, тепловым пиком или пиком после пламени. Пик пламени был смоделирован в результате ионизации в химических реакциях (Reinmann et al., 1997; Wilstermann, 1999). Saitzkoff et al. (1996) сделал первый подход к объяснению физики, стоящей после пика после пламени.

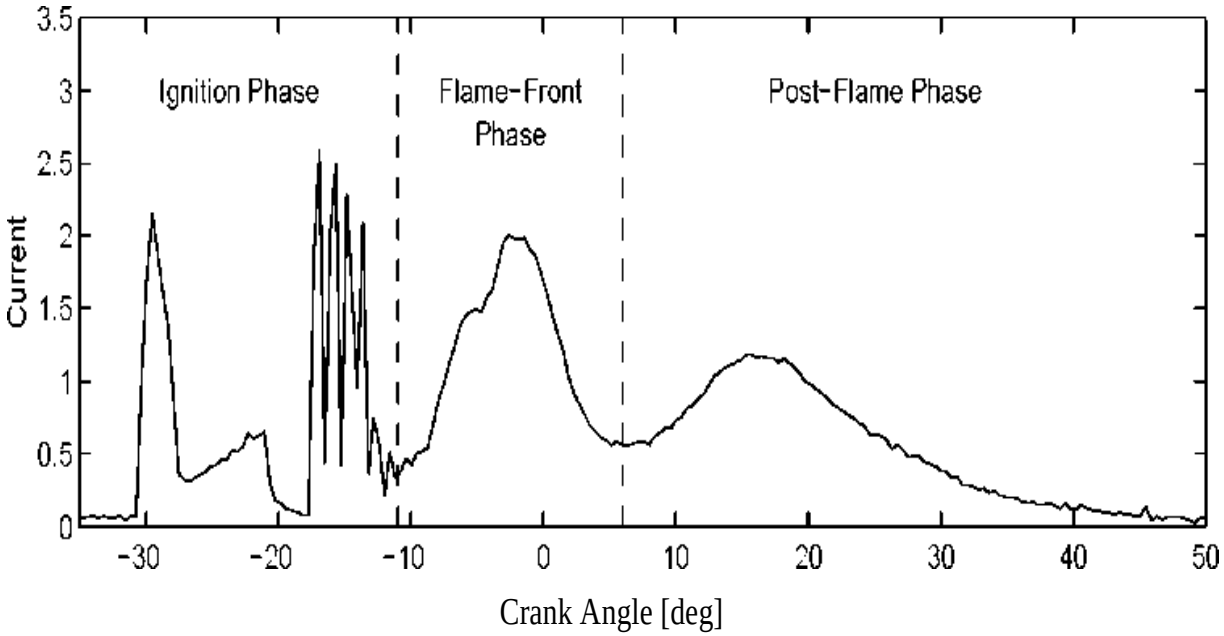

Рисунок 1.2 - Пример тока ионизации с тремя характерными фазами. (Эрикссон (1999))

Подход предполагает термическую ионизацию оксида азота как источника свободного заряда в камере сгорания, поэтому название теплового «пика». Тепловой пик также имеет сильную корреляцию в отношении давления в цилиндре (Eriksson et al., 1996; Nielsen and Eriksson, 1998). Это свойство ионизационного тока делает его интересным для использования в системах управления двигателем для управления синхронизацией отжига и диагностики горения.

Общее понимание заключается в том, что измеренный ток ионизации имеет место в процессах термической и химической ионизации,

происходящих во время сгорания. Тем не менее, несколько других процессов активно влияют на форму тока, прежде чем он будет измерен AD-преобразователем. Свободный электрический заряд должен двигаться в электрическом поле, вызванном измерительными электродами, и вызывать электрический ток в измерительной цепи. Электроны поглощаются на положительном электроде и испускаются при отрицательном. Работа по моделированию включает в себя решение о том, какой процесс ограничивает ток ионизации в каждый момент. В более ранних исследованиях представлены три разных модели, и все они основаны на разных предположениях о предельном прогрессе в ионизации и измерительной цепи. В следующих разделах объясняются три модели с их основными предположениями и, если они представлены ранее, их уравнения.

Модель второго пика ионного тока была представлена Saitzkoff et al. (1996). Идея модели. Контрольный объем цилиндра в двух электродах свечи зажигания содержит свободные электроны от термической ионизации NO. Электрическое поле между электродами создает движение электронов. Движение свободных электронов доминирует над течением, так как они сильно подвижны по сравнению с положительными ионами. Доминирующим процессом генерации свободных электронов является тепловая ионизация NO и может быть описана уравнением Саха (см. Saitzkoff et al. (1996):

$$\frac{n_1 \cdot n_e}{n_0} - 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot k \cdot T}{h^2}\right)^2 \cdot \frac{B_1}{B_0} \cdot exp\left(-\frac{E_1}{k \cdot T}\right) \qquad (1.1)$$

который описывает равновесный баланс ионов и электронов для ионизации первого порядка. В сочетании с моделями для скорости дрейфа электронов и электрического поля.

Модель видит заряд свободного места, на который влияет электрическое поле, создаваемое измерительным зондом, свечей зажигания.

Движение заряда не меняет поле внутри камеры сгорания значительно, поскольку перераспределенный заряд находится в такой малой величине. Движение, однако, измеримо во внешнем контуре. Основным пределом тока является доступ свободных электронов. В какой-то момент, когда Us все еще отрицателен, текущий вклад электронов и положительных ионов равен, а чистый ток равен нулю. Эта точка называется плавающим потенциалом. При Us = 0 электронный ток доминирует над положительным ионным током из-за более высокой подвижности и более высокой температуры. Первое уравнение справедливо для электронов. Электрическое поле вокруг центрального электрода вызовет перераспределение заряда в камере сгорания. Заряд с противоположным знаком для нас будет собираться вокруг электрода и исключать поле в остальной части камеры сгорания. Для Us > 0 концентрация электронов ne вокруг электрода будет возрастать по мере увеличения Us. Затем ток ограничивается поверхностным процессом электрода. Поверхностный процесс на электродах можно описать как

$$I_e = n_e \cdot e \cdot A_s \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{2 \cdot \pi \cdot m_e}} \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot l \cdot d}{16 \cdot \lambda_e \cdot B_e} ln \frac{X_e \cdot B_e}{X_e - B_e}\right)^{-1} \quad (1.2)$$

$$I_i = n_i \cdot e \cdot A_s \sqrt{\frac{k \cdot T_i}{2 \cdot \pi \cdot m_i}} \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot l \cdot d}{16 \cdot \lambda_i \cdot B_i} ln \frac{X_i \cdot B_i}{X_i - B_i}\right)^{-1} \quad (1.3)$$

на положительном электроде, а второй действует для положительных ионов на отрицательном электроде. 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. По мере увеличения напряжения измерения Us увеличивается концентрация электронов вокруг электрода ne и, следовательно, ток. Предположение здесь состоит в том, что доступ

свободных электронов в камеру сгорания достаточен для необходимого перераспределения. Дано не было уравнения для отношения между ne и Us.

Йошаяма и др. (2000) представил теорию, основанную на ионизации пламени. Эксперименты проводились в горючей бомбе, как на рисунок 1.3. 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. Воздушно-топливная смесь зажигалась, и ионизационный ток измерялся между электродами для различных электрических конфигураций стенки камеры. Камера следила за пламенем и снимки синхронизировались с измеренным током. Результирующий ток показывает в некоторых случаях два характерных пика.

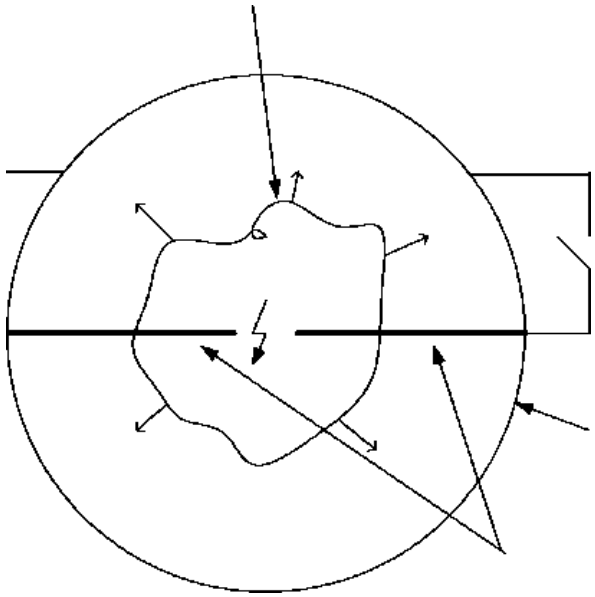

Рисунок 1.3 - Модель Йошияма-Томита

Первый ионный пик появляется, когда фронт пламени близок к искровому промежутку во всех тестах.

Эксперименты с двигателями, использующими различные типы свечей зажигания, показывают сильную зависимость геометрии от измеренного тока ионизации. Сделаны следующие выводы:

1. Увеличенный центральный электрод увеличивает амплитуду теплового пика. Этот факт поддерживает все три теории.

2. Более крупный электрод заземления увеличивает амплитуду пика пламени. Это подтверждают модели Calcote и Yoshiyama-Tomita. Модель Сайцкова-Рейнмана не включает фазу фронта пламени.

3. Форма пика пламени зависит от формы заземляющего электрода. Это также поддерживает модели Calcote и Yoshiyama-Tomita.

4. Форма теплового пика зависит от питания электронов от легко ионизованных видов как NO и щелочных металлов. Этот факт сразу же объясняется моделью Сайцкова-Рейнмана, но справедливы и две другие модели.

Три модели имеют разные виды процесса генерации ионного тока в цилиндре и измерительной цепи. Модель Рейнмана предполагает, что в измерительной цепи обнаруживается ток, если заряд движется в электрическом поле внутри цилиндра (процесс 1). Заряд не должен находиться в контакте с электродами. Модель Calcote считает, что газо-электродный переход и процесс переноса заряда являются наиболее важными. Это означает, что заряд должен достигнуть электрода, чтобы определить ток (процессы 2 и 3). Мобильность - это важное свойство. Модель Calcote также утверждает, что ток на двух электродах не должен быть равен. Самый подвижный заряд, электрон, будет доминировать над ионным током. Модель Йосиямы и Томита утверждает, что ток на двух электронах должен быть равен, так как ток, по-видимому, ограничен более медленными положительными ионами на фронте пламени (процессы 2 и 3).

В качестве примера можно привести второй пик ионизационного тока, сильно связанный с пиком давления цилиндра в модели Сайцкова-Рейнмана, но для модели Йошияма-Томиты это означает, что фронт пламени имеет максимальную площадь контакта со стенками камеры. Это не одно и то же. Для дальнейшего изучения этой идеи необходимо знать, как работает измерительная схема, но это исследование остается для будущей работы.

1.5 Электропроводность пламени как метод изучения процесса сгорания в поршневых ДВС искровым зажиганием

В работе [10] схема мониторинга ионного тока включает свечу зажигания, измерительный резистор и усилитель (рисунок 1.4).

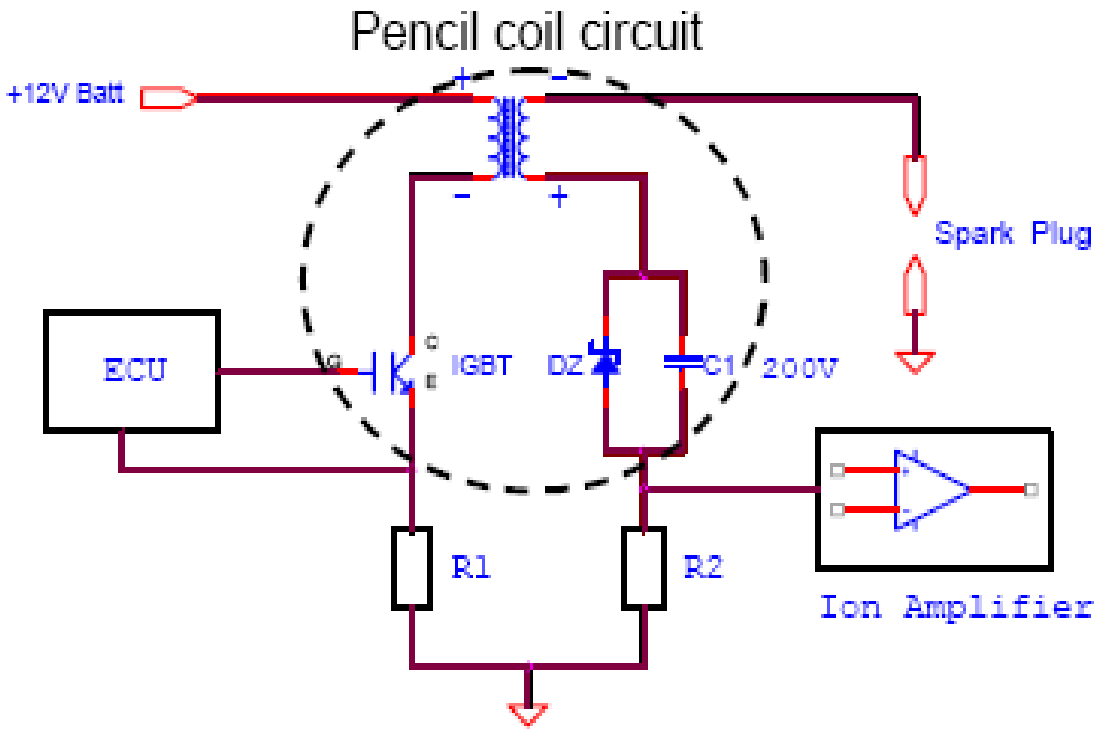

Рисунок 1.4 - Схема мониторинга ионного тока

Измерения начинают с момента пробоя искрового промежутка, получают следующую картинку, как это показано на рисунке 1.5:

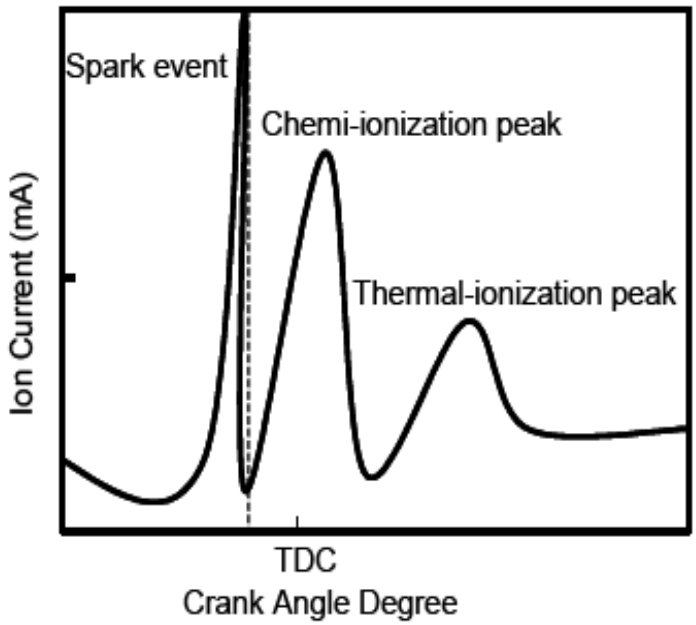

Рисунок 1.5 - Вид сигнала ионного тока

В публикации шведских исследователей [13] показана только принципиальная схема измерений ионного тока в цепи свечи зажигания (рисунок 1.6)

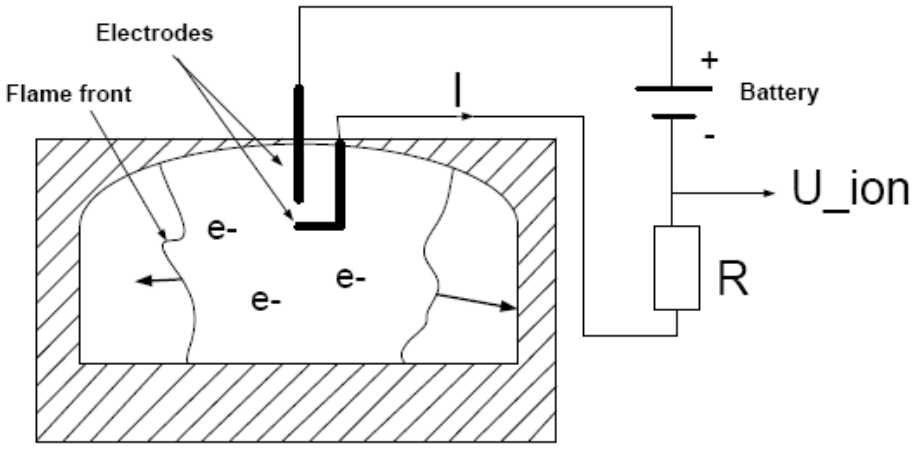

Рисунок 1.6 - Принципиальная схема измерений ионного тока в цепи свечи зажигания

Практически аналогичная схема опубликована в работе [11] по исследованию процесса сгорания в бомбе постоянного объема (рисунок 1.7)

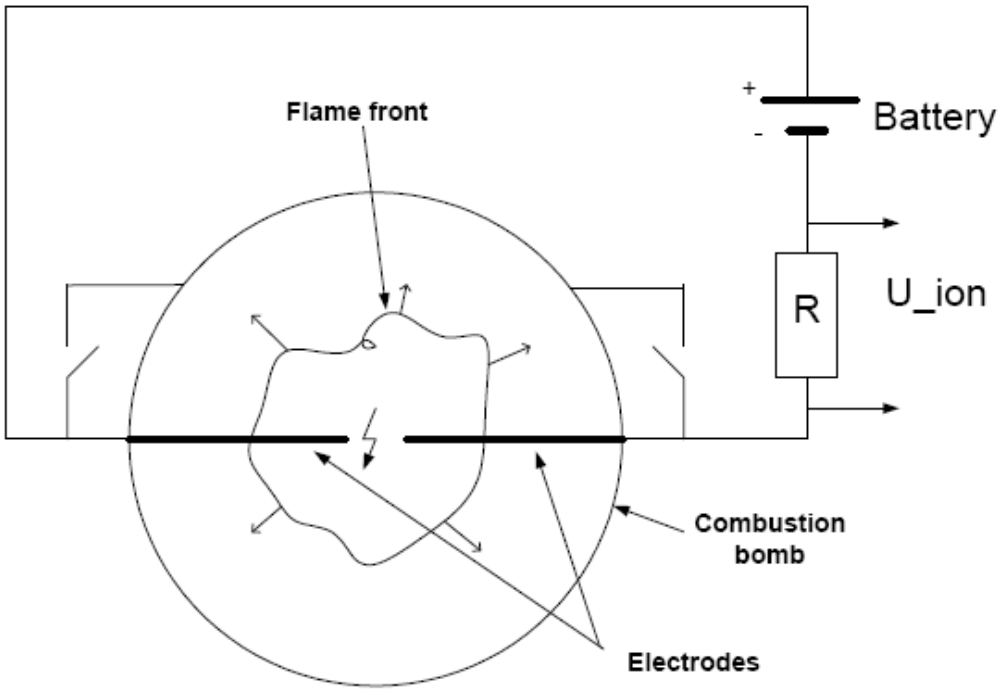

Рисунок 1.7 – Схема регистрации ионного тока в бомбе постоянного объема в цепи свечи зажигания

В статье [3] свеча зажигания также используется как ионизационный зонд для обнаружения пропусков зажигания и контроля детонации. Схема мониторинга ионного тока, используемая в данной работе показана на рисунке 1.8

В работе [12] описывается использование свечи зажигания как датчика ионизации в индуктивной системе зажигания с ограничением времени искрового разряда.

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 (рисунок 1.9, 1.10). Одна цепь используется для создания искрового разряда, а вторая для возбуждения ионного тока в искровом промежутке цепи.

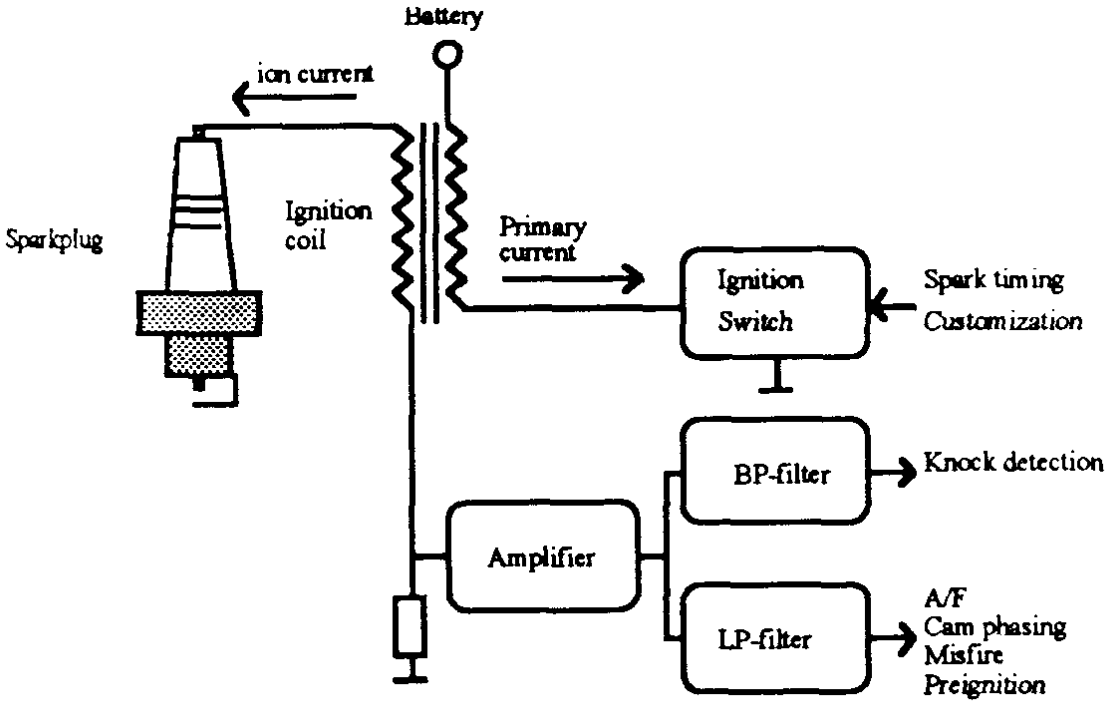

Рисунок 1.8 - Схема мониторинга ионного тока

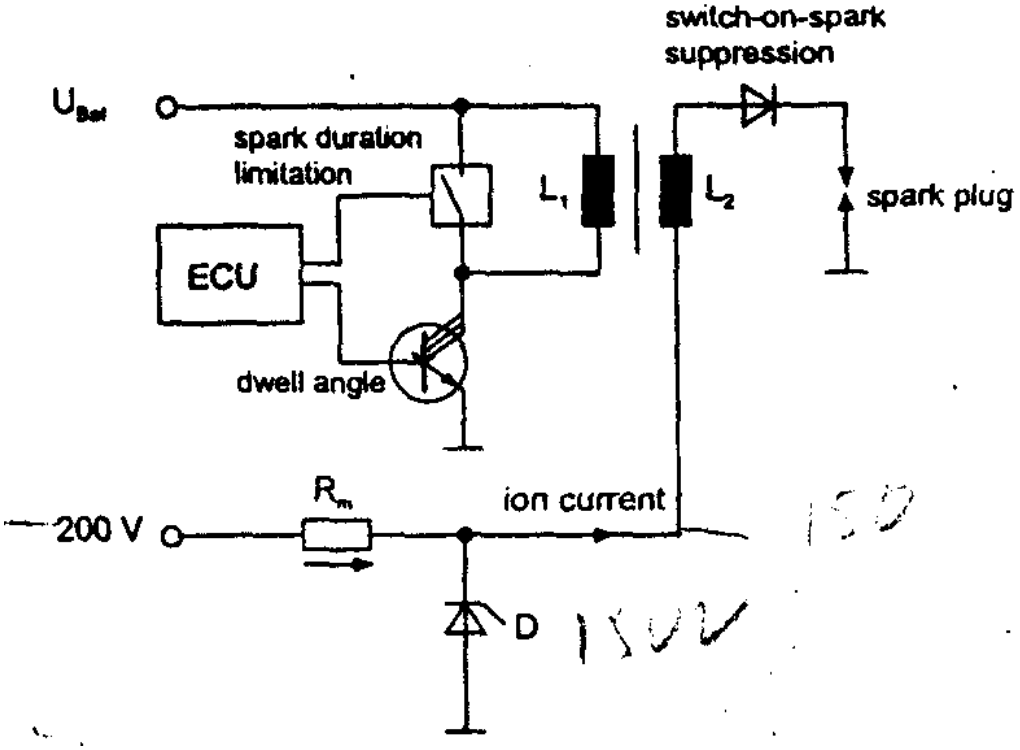

Рисунок 1.9 - Схема индуктивной системы зажигания с использованием свечи зажигания в качестве датчика ионизации

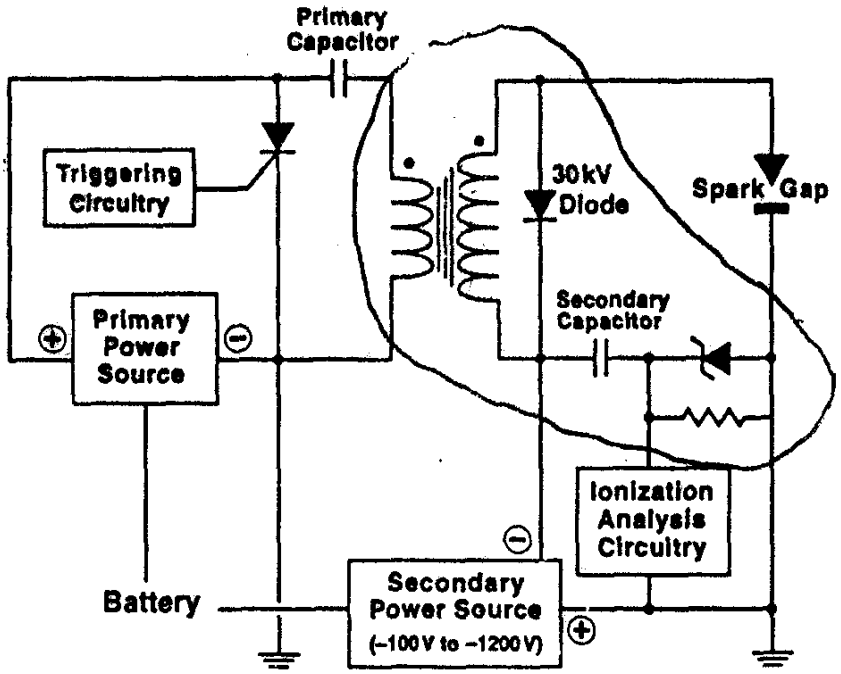

Рисунок 1.10 - Схема контура цепи зажигания с двумя источниками питания

Кроме того, весьма интересной представляется схема, предложенная специалистами Daimler Chrysler. В их работе [14] использована система зажигания переменного тока. В этой статье технология использования переменного тока для мониторинга ионного тока в камере сгорания сравнивается со стандартной технологией постоянного тока и её известными недостатками: дорогими высоковольтными компонентами, чувствительностью к загрязнению свечи и дорогой электроникой.

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.

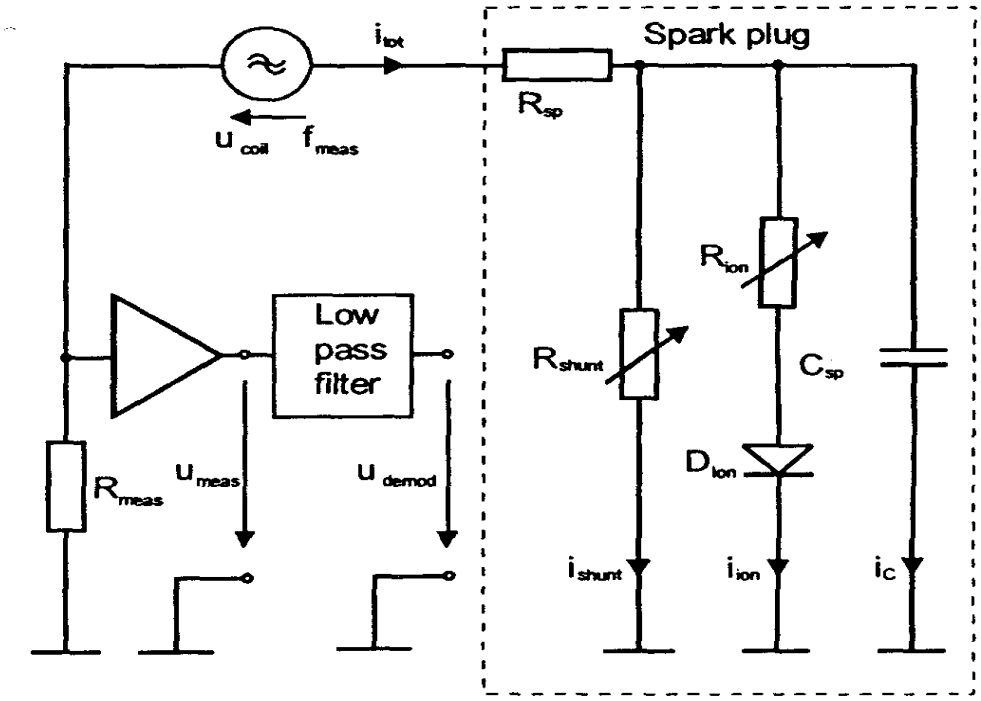

Рисунок 1.11 - Схема обнаружения ионного тока при использовании переменного напряжения

Однако в данных публикациях никак не описана методология анализа сигналов ионного тока в различных местах камеры сгорания кроме анализа самого факта наличия сигнала, показывающего момент прихода фронта пламени к данной точке.

Для реализации алгоритмов оптимального управления и разработки новых электронных компонентов систем управления двигателем необходимо моделирование процесса сгорания на основе экспериментальных данных, полученных с помощью мониторинга ионных токов.

Исследования, проводимые [24,25-28], показали, что между электропроводностью пламени и свойствами топливно-воздушной смеси,

характеристиками процесса сгорания имеются однозначные взаимосвязи, между:

- электропроводностью и скоростью распространения пламени;
- электропроводностью и составом топливно-воздушной смеси;
- электропроводностью и составом токсичных составляющих продуктов сгорания;
- электропроводностью и количеством добавляемого водорода;
- электропроводностью и максимальным давлением в цилиндре двигателя.

В основном с помощью измерений ионного тока в искровом промежутке свечи зажигания диагностируются пропуски зажигания [3], работы A. Lee et all [Engine misfire detection by ionization current monitoring / SAE Paper № 950003, 1995] и L. Eriksson et all тому подтверждения.

В работе [14] показывается возможность оценки загрязнений свечи зажигания, а также калильного зажигания с помощью цифровой обработки сигналов ионного тока. Для этого оценивается амплитуда сигнала ионного тока, которая зависит от величины сопротивления электродов свечи зажигания. Также в этой работе высказывается предположение о возможности анализа термодинамических характеристик рабочего процесса с помощью анализа изменения сигнала ионного тока.

Аналогично в работе [15] Предлагается использование датчика ионизации для оценки массовой доли сгоревшего заряда.

Интересное использование сигнала ионного тока предлагается в работе [16]. Предлагается информацию, полученную в ходе экспериментов с ионизационным датчиком, использовать для уточнения параметров полуэмпирических моделей тепловыделения в камере сгорания двигателя.

В исследованиях R. Reinmann et all предлагается оценивать состав смеси (соотношение топливо-воздух) с помощью анализа сигнала ионного тока. Анализ сигнала ионного тока в данной работе основан на выделении двух последовательных максимумов ионного тока на свече зажигания. Описанные результаты экспериментов показывают, что амплитуда первого

пика сигнала практически линейно отражает состав смеси в диапазоне α от 0,9 до 1,1.

Также попытки анализа динамики тепловыделения в цилиндре проведены A. Saitzkof в своих работах [9], где предполагается оценка местоположения пика давления на индикаторной диаграмме с помощью анализа сигнала ионного тока в искровом промежутке свечи зажигания.

В работе [17] предлагается использование технологии мониторинга ионного тока для диагностики сгорания в газовом двигателе, работающем на метане на предельно обедненных смесях. При осуществлении такого рабочего процесса важным является поддержание такого режима работы систем топливоподачи и зажигания, чтобы межцикловые вариации давления цикла и продолжительности сгорания не превысили определенных значений. В ходе экспериментов, проведенных в данной работе, выявлена корреляция между коэффициентами вариации значений давления цикла и амплитуды сигнала ионного тока.

Использование свечи зажигания в качестве ионизационного зонда в экспериментах, описанных в работе [22] позволило выявить следующие закономерности. Амплитуда сигнала ионного тока на свече растет при возрастании нагрузки и скоростного режима. При добавках в топливо антидетонационных присадок типа МТБЭ (метилтрибутиловый эфир) сигнал ионного тока возрастает. Возрастание степени рециркуляции отработавших газов имеет примерно тот же эффект, что и обеднение смеси, т.е. снижение амплитуды сигнала ионного тока и увеличение промежутка времени от искрового разряда до возникновения сигнала ионного тока. Также сигнал отзывается на изменение угла опережения зажигания. При увеличении угла опережения зажигания амплитуда сигнала остается примерно постоянной, а продолжительность существования сигнала увеличивается.

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.

В исследованиях проведенных в ТГУ также был получен большой экспериментальный материал по использованию электропроводности пламени в удаленной от свечи зажигания части камеры сгорания.

Полученные данные показывают, возможность решения проблемы с неравномерностью свойств бензинов и, так как электропроводность племени у стенок камеры сгорания позволяет определять свойства ТВС и основные характеристики процесса сгорания и проводить регулирование двигателя на всем диапазоне нагрузок и составов смеси.

ГЛАВА 2 Описание экспериментального оборудования и план проведения экспериментальных исследований

2.1 Экспериментальная установка

В качестве основного источника информации о электропроводности пламени в условиях поршневого ДВС используется одноцилиндровая установка УИТ-85 принципиальная схема которой приведена на рисунке 2.1 показано место установки датчиков ионизации. Представленная конструктивная схема головки блока цилиндра позволяет получить более полную картину процесса сгорания и факторов, влияющих на исследуемый процесс.

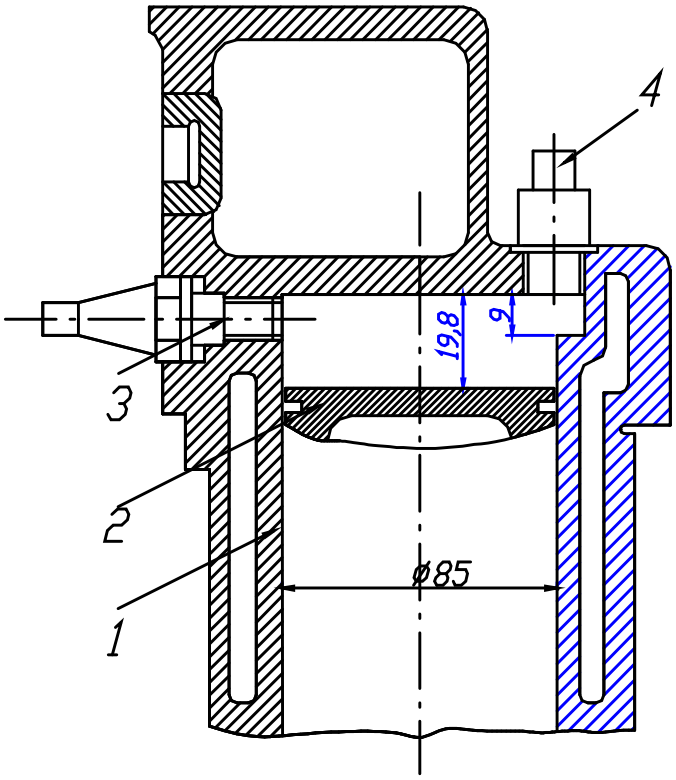

Рисунок 1.1 - Схема установки датчика в камере сгорания УИТ-85:
1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – свеча зажигания; 4 – место для установки датчика

Конструкция ИД используемая для установки в головку блока цилиндров двигателя ВАЗ – 1111 представляет собой двухканальную керамическую соломку, в каналах которой расположены электроды (рисунок 1.2). Расположение ИД способствует получению достаточно полной информации о процессе сгорания. Первый из трех ИД установлен вблизи свечи зажигания для регистрации распространения фронта пламени в начальный момент времени (рисунок 1.3). Второй в непосредственной близости от выпускного клапана в середине КС и самой разогретой части КС для регистрации сигнала во время основной фазы сгорания. И третий - в наиболее удаленной от свечи зажигания части КС для регистрации сигнала в районе вытеснителя.

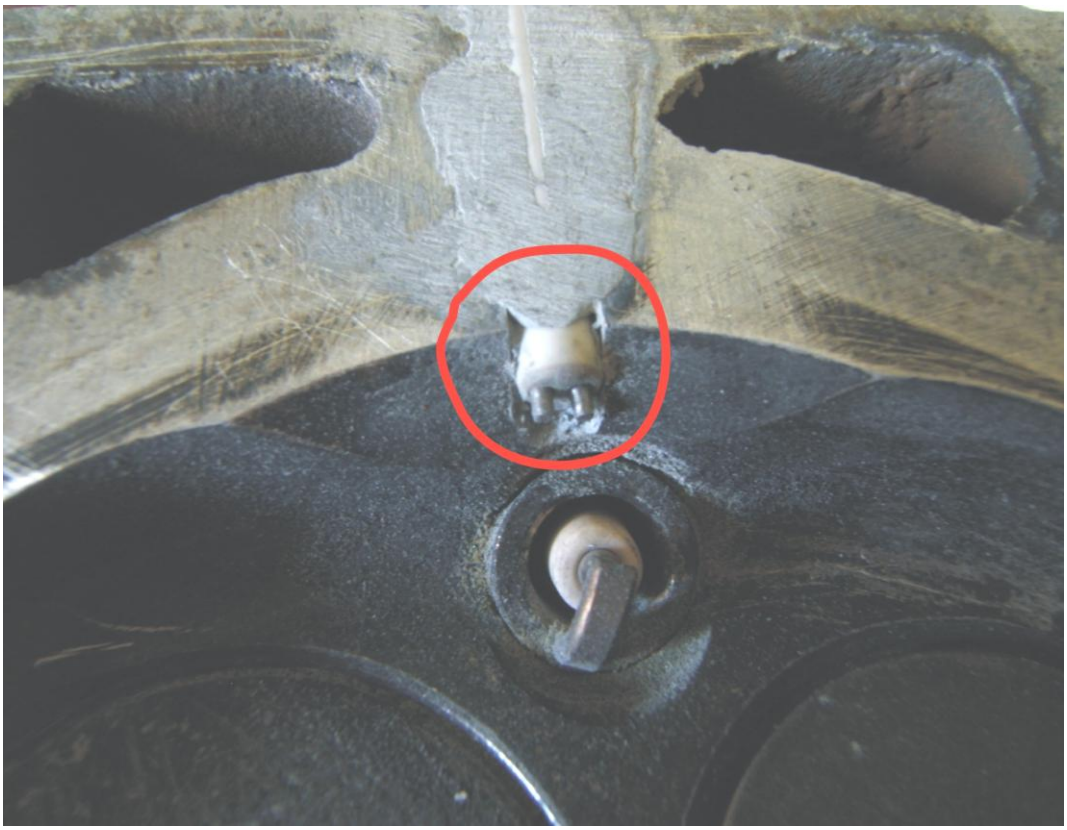

Рисунок 1.2 - ИД расположенный в головке блока двигателя около свечи зажигания

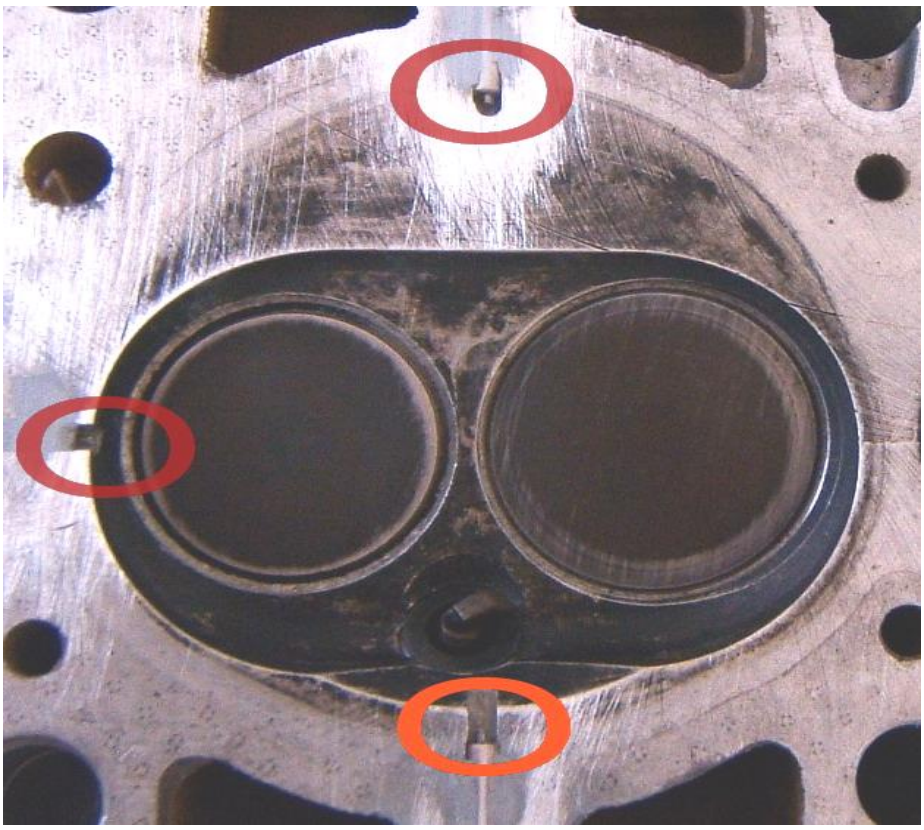

Рисунок 1.3 - Расположение ИД в КС ДВС

2.2 Описание схемы измерения и записи показаний ИД

Измерение тока через ИД, установленный в цилиндре ДВС, проводилось по схеме, приведенной на рисунке 1.4. Схема включает в себя источник ЭДС Е, измерительное сопротивление $R_{изм}$, ИД - А1. При измерении, снимали напряжение $u_{изм}$ с сопротивления $R_{изм}$, которое пропорционально току $i_э$ протекающему через ИД:

$$i_{изм} = u_{изм}/R_{изм} \quad (2.1)$$

где $U_{изм}$ - падение напряжения на сопротивлении Rизм, В

$R_{изм}$ – измерительное сопротивление, кОм

$i_{изм}$ – ток в цепи ионизационного зонда, мА

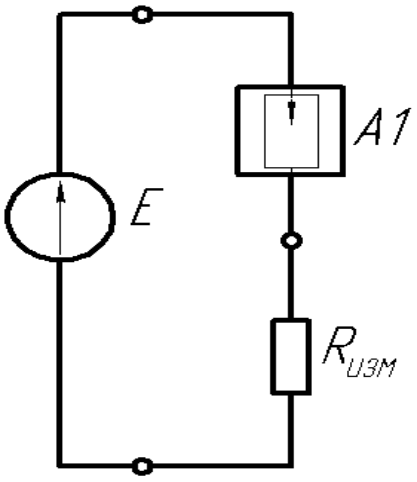

Рисунок 1.4 – Электрическая схема измерения тока

В качестве источника ЭДС, использовали специализированный источник питания, который имеет характеристики, представленные в таблице 2.1.

В качестве измерительного сопротивления $R_{изм}$ использовали магазин сопротивлений Р33.

Визуальное наблюдение сигналов проводилось с помощью осциллографа Textronics TDS 1012.

Таблица 2.1 – Основные характеристики источника питания

Наименование характеристики	Значение	Ед. измер.
Номинальное напряжение питания	220	В
Максимальная, потребляемая мощность	13	Вт
Коэффициент мощности	не менее 0,9	-
Минимальное выходное напряжение	10	В
Максимальное выходное напряжение	950	В
Регулировка выходного напряжения	плавно	-
Максимальный выходной ток	0,01	А
Регулировка выходного тока	нет	-
Внутренне сопротивление (в диапазоне до максимального тока)	не более 70	мОм
Защита от превышения тока	есть	-
Управление	ручное	-

Для записи осциллограмм ионного тока с ИД использовался многоканальный АЦП Е-440 фирмы “L-Card”. Схема экспериментального комплекса показана на рисунке 1.5.

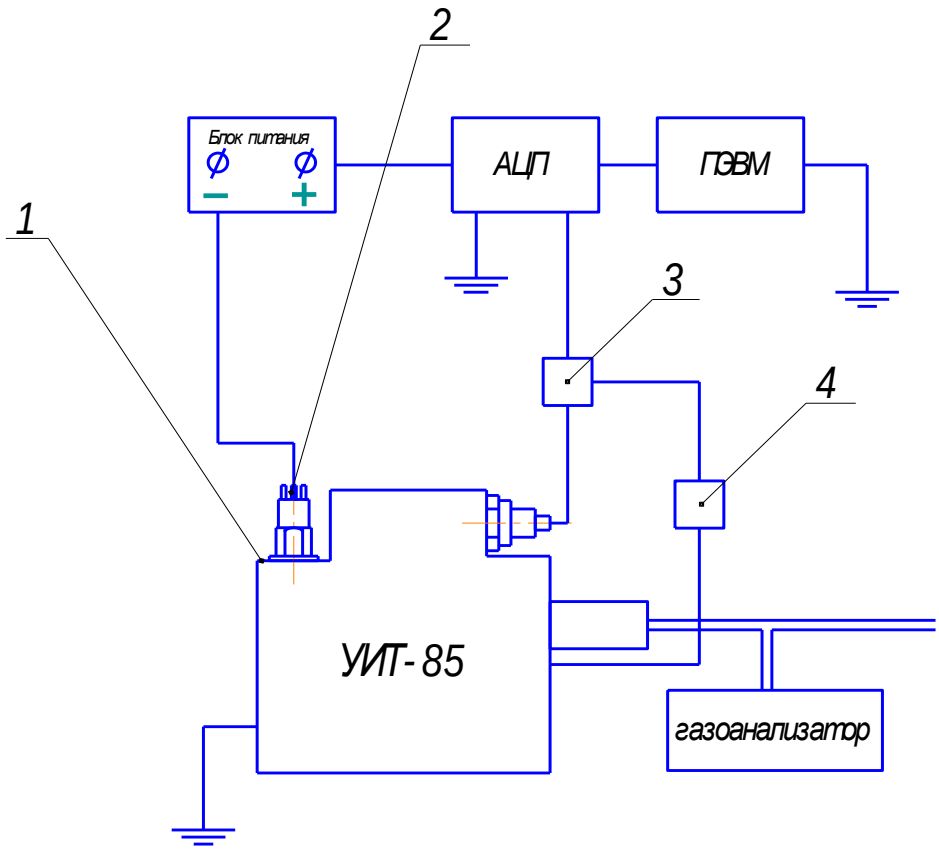

Рисунок 1.5 - Схема экспериментального стенда с одноцилиндровой установкой

2.3 Программа проведения испытаний

2.3.1 Провести испытания на одноцилиндровой установки УИТ-85 с применением ИД различных конструкций, с замером выделений токсичности в ОГ, температуры отработавших газов в выпускном коллекторе, показаний магнитострикционного и пьезоэлектрического датчиков и записью сигналов ионного тока на каждом режиме.

2.3.2 Провести испытания на двигателях ВАЗ-2111 со снятием регулировочной характеристики по составу топливовоздушной смеси с замером выделений токсичности в ОГ, температуры отработавших газов в выпускном коллекторе, показаний магнитострикционного и пьезоэлектрического датчиков и записью сигналов ионного тока на каждом режиме.

ГЛАВА 3 Оценка результатов проведенных стендовых исследований по теме диссертационного исследования и их анализ

3.1 Использование электропроводности пламени для определения средних скоростей и продолжительности процесса сгорания

Регистрация перемещения фронта пламени в камере сгорания осуществлялась датчиками ионизации установленными в переходник со свечей зажигания и переходник с датчиком давления в зоне установки магнитострикционного датчика, они показаны на рисунке 3.1.

Рисунок 3.1 - Датчики ионизации: в переходнике рядом со свечей зажигания и расположенный в удаленной части камеры сгорания датчиком давления ДМВГ

Для оценки влияние скорости распространения пламени на его электропроводность и продолжительность протекания фаз сгорания были взяты такие параметры процесса сгорания, как:

- $V_2 = \frac{85-7}{t_2-t_1}$, м/с - средняя скорость во 2 фазе, определялась как расстояние до датчика в удаленной части КС равное 85 мм отнять расстояние до датчика у свечи зажигания равное 7 мм, деленное на разницу во времени появления сигнала на этих датчиках;

- продолжительность основной фазы сгорания оценивалась по промежутку от момента подачи искры до достижения максимума давления.

На рисунке 3.2 представлено зависимость скорости распространения пламени в 1-ой, 2-ой и основой фазах сгорания от угла опережения зажигания, а также продолжительность основной фазы сгорания СПГ в УИТ-85 при n = 600 об/мин, ε = 7 и α = 1,04. Из рисунка видно, что увеличение УОЗ приводит к росту скорости распространения пламени, что связано с тем что сгорание в основной фазе протекает в большей части при сжатии, а следовательно термодинамическая энергия выделяемая при сгорании тратится для большего сжатия, что ещё больше ускоряет процесс сгорания. Так сокращение продолжительность основной фазы сгорания определяемой по Pz при изменении УОЗ от 0 до 11 и 33 ПКВ составило 3,7 и 13% соответственно. Увеличение средней скорости распространения пламени для 1-ой фазы составило 13,4 и 38.6 %, для 2-ой фазы 7,9 и 45,2 %, а для основной фазы 9 и 43,5 % при УОЗ от 0 до 11 и 33 ПКВ соответственно. Из представленных данных на рисунке 3.3 видно, что увеличение угла сказывается в значительном увеличении турбулентной скорости сгораний во второй фазе.

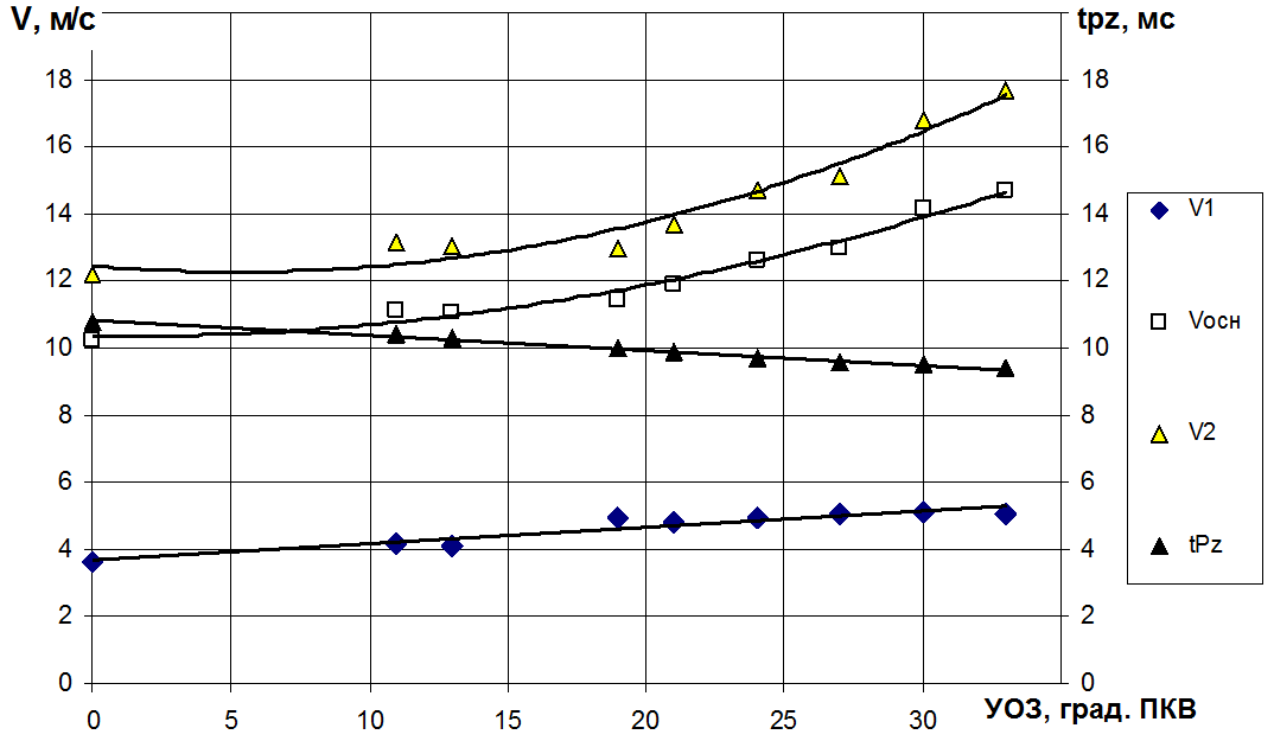

Рисунок 3.2 - Зависимость скорости распространения пламени в 1-ой, 2-ой и основой фазах сгорания от угла опережения зажигания для УИТ-85 на природном газе

На рисунках 3.3 и 3.4 представлены графики зависимости средней скорости распространения фронта пламени во второй фазе сгорания от состава смеси по коэффициенту избытка воздуха при варьировании массовой долей, активирующего процесс сгорания, газообразного водорода, при изменении скоростного режима работы с 900 до 600 мин$^{-1}$, соответственно.

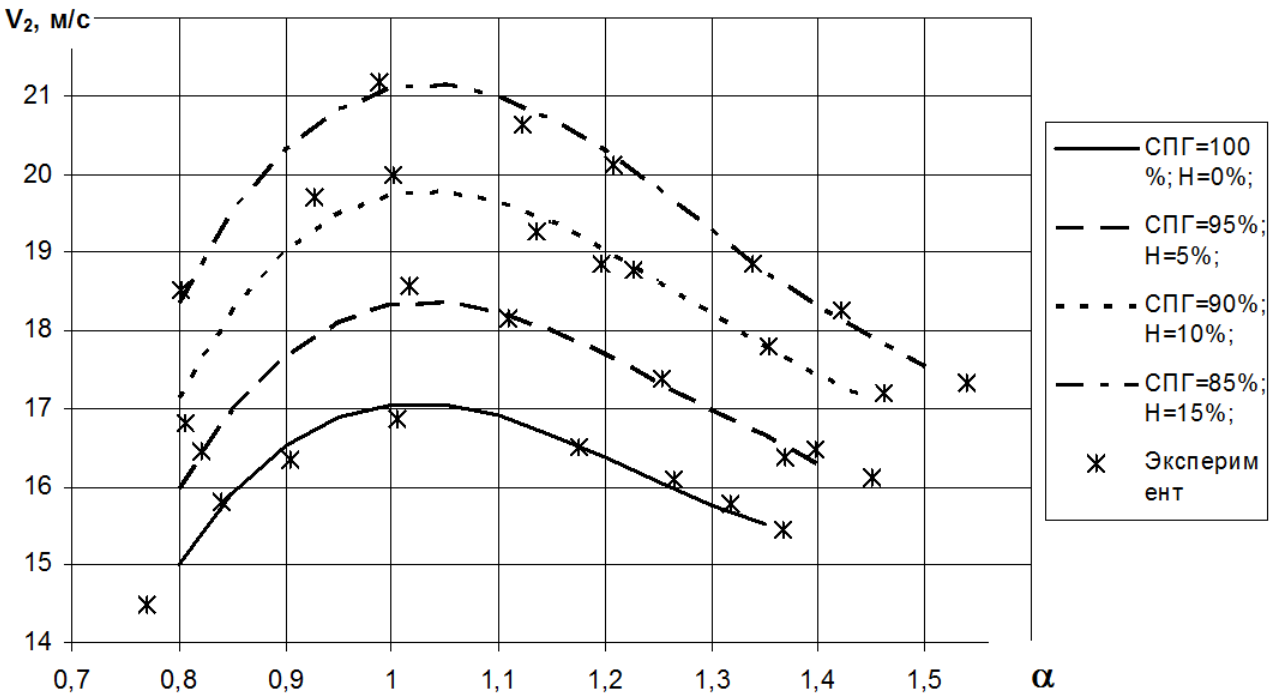

Рисунок 3.3 - Графики зависимости средней скорости распространения фронта пламени во второй фазе сгорания от состава смеси по коэффициенту избытка воздуха при варьировании массовой долей водорода, при 900 мин$^{-1}$

Повышении эффективности рабочего процесса ДВС, требует разработки совершенно новых подходов позволяющих работать на обедненной топливно-воздушной смеси, и связано с проведением комплексных теоретических и экспериментальных исследований горения углеводородов в условиях поршневого ДВС.

За последние 20 лет в нашей стране исследования характеристик работы поршневых двигателей проводились по принципу «черного ящика», измерялись параметры на входе и на выходе без исследования процессов, протекающих в цилиндре двигателя. Обеспечение перспективных норм по токсичности при существенном увеличении эффективности работы ДВС потребовало новых подходов к проектированию и конструированию перспективных двигателей, особенно работающих на альтернативном топливе, например с добавками водорода.

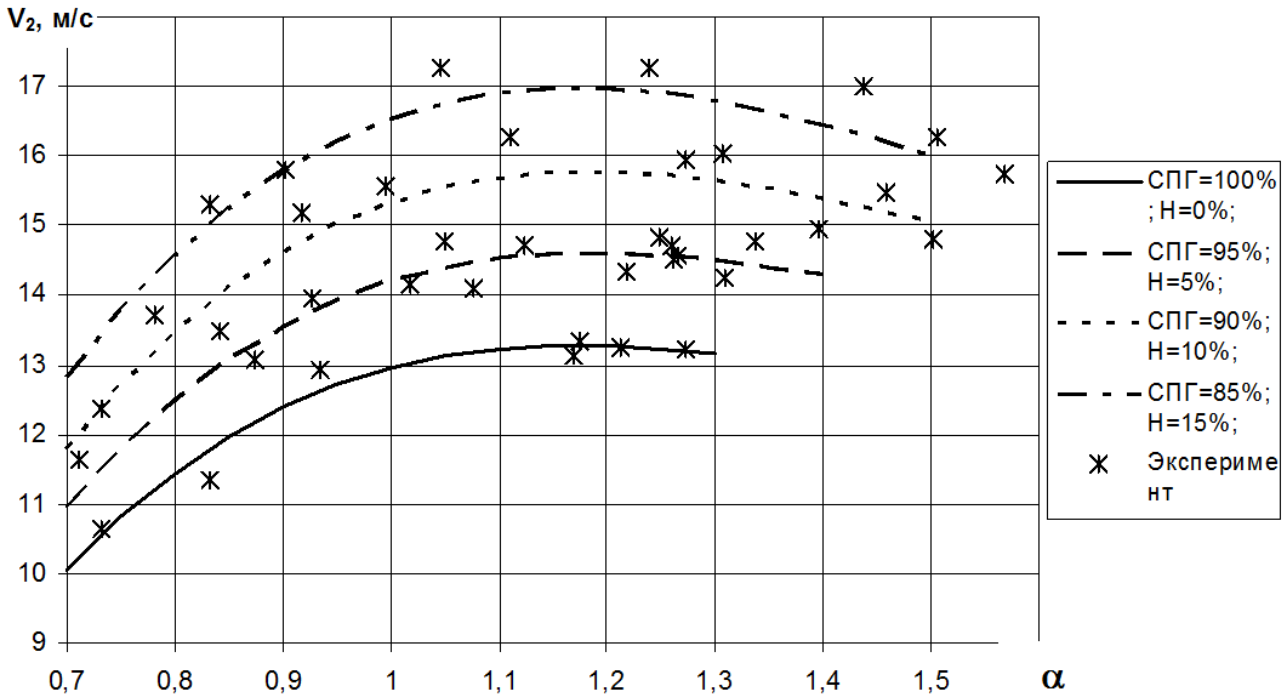

Рисунок 3.4 - Графики зависимости средней скорости распространения фронта пламени во второй фазе сгорания от состава смеси по коэффициенту избытка воздуха при варьировании массовой долей водорода, при 600 мин$^{-1}$

Так в среднем прирост средней скорости при увеличении добавки водорода на 5% (в диапазоне от 0 до 15%) для частоты вращения 600 об/мин составляет примерно 7.6% при α = 1 и 9% при α = 1.2, а для 900 об/мин 8.2 и 8.5%, соответственно.

Проектирование, конструирование и доводка современных ДВС, обеспечивающих выполнение норм по токсичности продуктов сгорания при полноте сгорания, практически равной единице, требует уточнения научных основ теории распространения пламени во всех фазах сгорания при изменяющихся в течение нескольких миллисекунд: температуре (в 4-5 раз) и давлению (в 3,5-4 раза) двигателя, особенно при использовании альтернативных видов топлива [1-4].

Предварительные записи осциллограмм с различными значениями сопротивления показали, что наилучшее соотношение сигнал – помеха в условиях данного эксперимента соответствует сопротивлению в 100 кОм. Для оценки того, что в эксперименте выходной сигнал линейно зависит от

входного напряжения и не находится в зоне насыщения оценена зависимость силы тока в цепи ионизационного зонда от входного напряжения. Получена линейная характеристика (рисунок 4) в диапазоне входного напряжения от 0 до 100 Вольт.

Поэтому одним из этапов разработки методик экспериментов было определение того минимального объема выборки, при котором достигается требуемая надежность результата. После проведения пробной серии замеров в 70 последовательных циклах установки УИТ – 85, показано, что для получения репрезентативной выборки с ошибкой определения среднего значения не более 15%, необходимо провести 27 измерений. В испытаниях принято измерять 30 последовательных циклов.

Полученная взаимосвязь объясняет хорошую корреляцию электропроводности пламени с токсичностью по NO_x, так как концентрация NO_x определяется в основном максимальной температурой в процессе сгорания, которая зависит в основном от состава смеси и максимумом давления.

Так на рисунках 3.4 и 3.6 показана взаимосвязь геометрической и объемной продолжительностью всего процесса сгорания от состава смеси, в УИТ – 85 на режиме работы 900 мин$^{-1}$, УОЗ = 13 град. ПКВ. Из рисунка 3.6 явно видно наличие корреляции между продолжительностью процесса сгорания и электропроводностью в пламени.

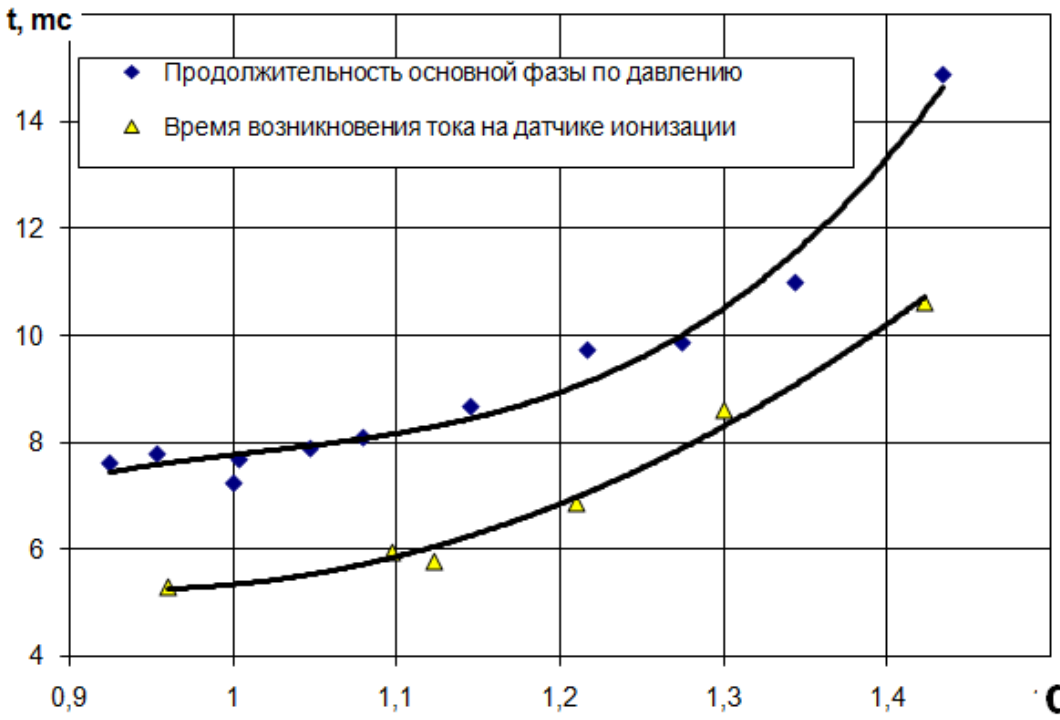

Рисунок 3.5 - Взаимосвязь продолжительности основной фазы сгорания от состава смеси, в УИТ – 85, режим работы 900 мин$^{-1}$, УОЗ = 13 град. ПКВ.

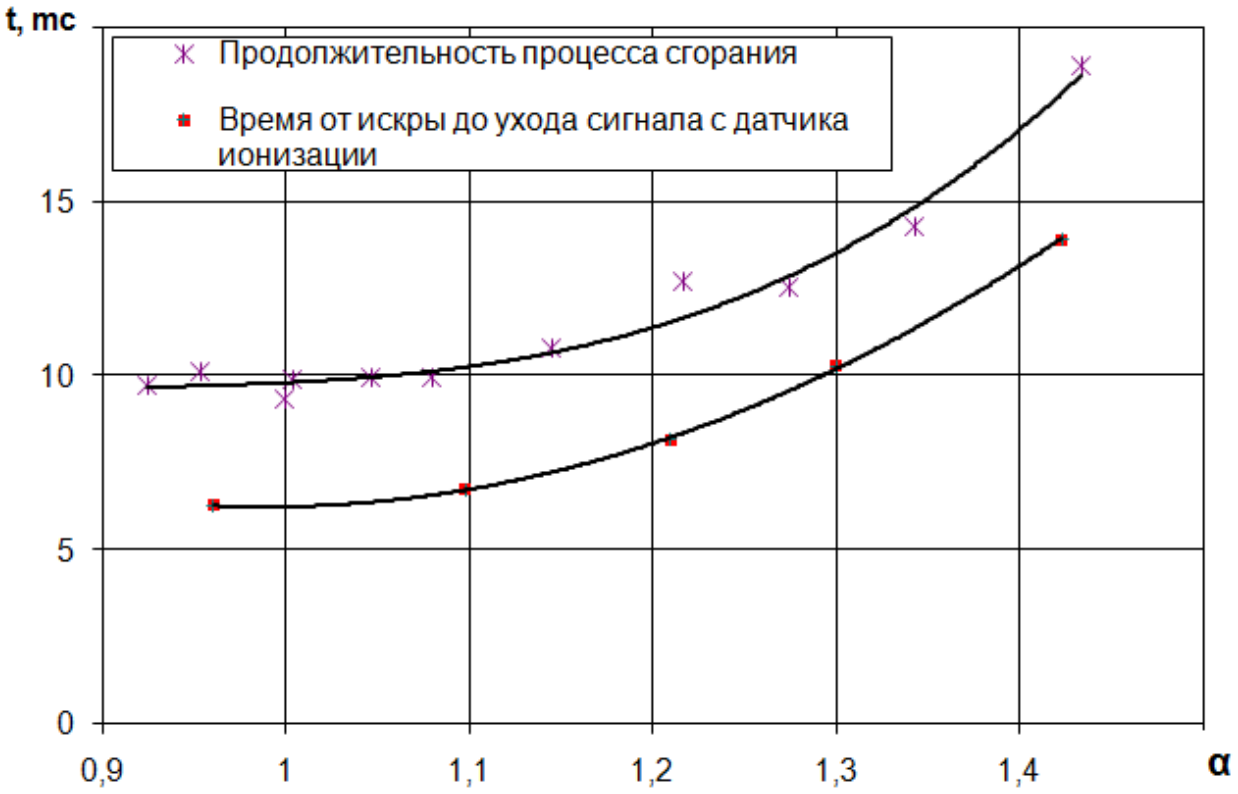

Рисунок 3.6 - Взаимосвязь продолжительности процесса сгорания от состава смеси, в УИТ – 85, режим работы 900 мин$^{-1}$, УОЗ = 13 град. ПКВ.

Полученные результаты (рисунки 3.5 и 3.6) показывающие наличие явно выраженной корреляции между продолжительностью основной фазы сгорания и всего процесса сгорания с электропроводностью пламени в наиболее удаленной части КС.

3.2 Электропроводность пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха

На рисунке 3.7 представлена зависимость амплитуды сигнала ионного тока пламени на датчике, установленном в удаленной части КС, от состава смеси при различных добавках водорода в СПГ для УИТ-85, режим работы n = 900 1/мин, УОЗ = 13°, ε = 7.

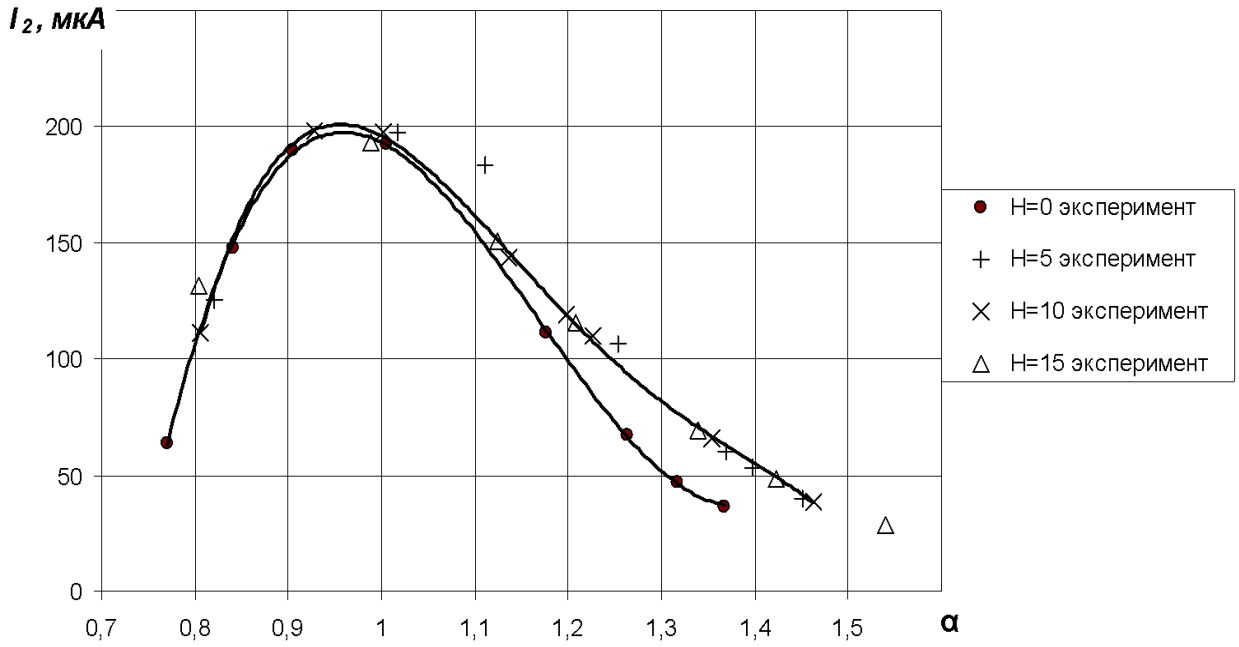

Рисунок 3.7 - Зависимость амплитуды сигнала ионного тока пламени на датчике, установленном в удаленной части КС, от состава смеси при различных добавках водорода в СПГ для УИТ-85, режим работы n = 900 1/мин, УОЗ = 13°, ε = 7.

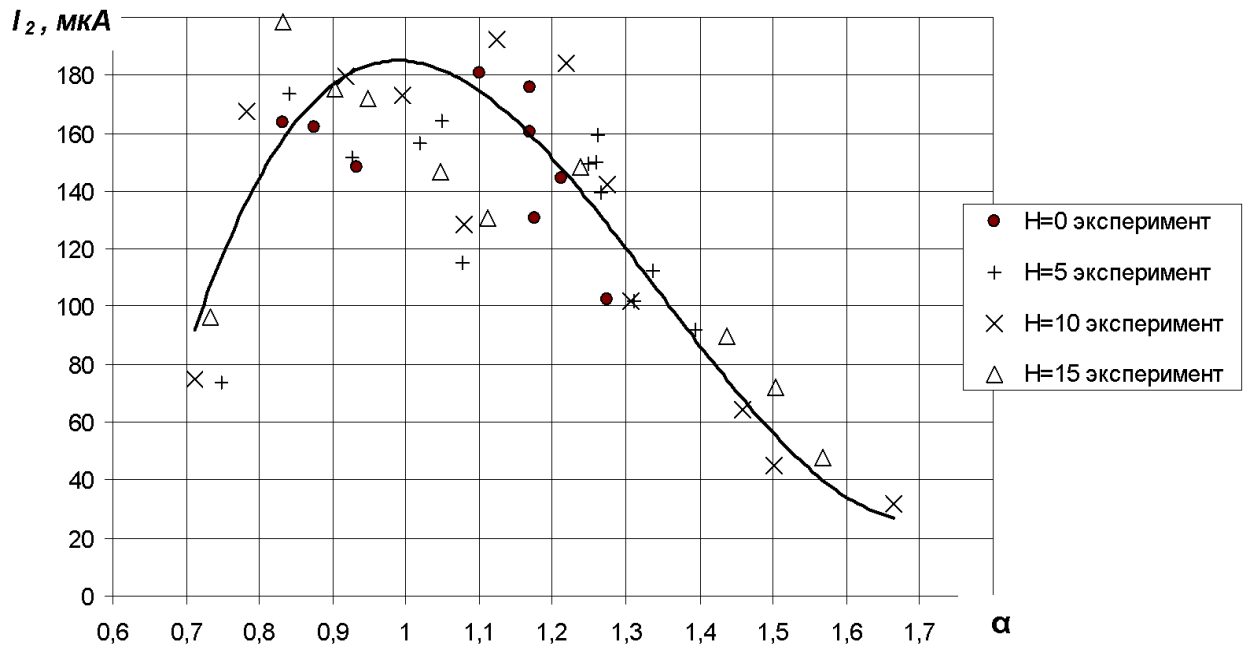

Рисунок 3.8 - Зависимость амплитуды сигнала ионного тока пламени на датчике, установленном в удаленной части КС, от состава смеси при различных добавках водорода в СПГ для УИТ-85, режим работы n = 600 1/мин, УОЗ = 13°, ε = 7.

Рассматривая амплитуду сигнала ионного тока проводимости в заключительной части процесса сгорания на датчике ионизации расположенном радиально на противоположной стороне КС от свечи зажигания (рисунки 3.7 и 3.8), следует отметить, что добавка водорода в зоне богатых и стехиометрических смесей не вносит заметных изменений в значения амплитуды ионного тока. В области бедных смесей наблюдается некоторое повышение амплитуды ионного тока при добавке водорода в СПГ, что характерно и для частоты вращения и 600 и 900 об/мин. Снижение амплитуды ионного тока при обеднении смеси объясняется, во-первых, уменьшением концентрации атомов углерода в смеси, а во-вторых, увеличением продолжительности сгорания, что приводит к снижению температуры и давления в момент достижения пламенем удаленной части КС, где установлен датчик ионизации. Так же если сравнивать значение амплитуды сигнала на датчике, установленном в удаленной части КС, при

изменении частоты вращения с 600 до 900 об/мин, то наблюдаются близкие значения во всем диапазоне состава смеси от α=0,8 до α=1,6. Отсюда следует сделать вывод, что в заключительной части сгорания роль изменения турбулентности потока вследствие увеличения оборотов не существенна и определяется в большем составом смеси. Также сравнивая значения амплитуды сигнала в начале и в конце процесса сгорания, следует отметить снижение амплитуды сигналы в завершающей части процесса сгорания, что может объясняться меньшей интенсивностью протекания химических реакций окисления во фронте пламени вследствие влияния процесса расширения на процесс сгорания.

В тоже время при рассмотрении влияния частоты вращения на амплитуду сигнала на датчике расположенном вблизи свечи зажигания (рисунки 3.7 и 3.8) наблюдается увеличение амплитуды ионного тока, что особенно заметно в диапазоне от α≈0,9-1,1, где прирост амплитуды составил 100-110 мкА для СПГ и 110-120 мкА для СПГ с добавкой водорода от 5 до 15% соответственно, что составило около 30% роста амплитуды. Данный рост как для СПГ, так и для СПГ с добавкой водорода объяснятся увеличением турбулентности с ростом оборотов, и согласно К.И. Щелкину увеличение турбулентности в КС пропорционально росту числа оборотов двигателя, т.е. увеличение частоты вращения с 600 до 900 1/мин привело к увеличению турбулентности в КС примерно на 25%, что соответствует росту амплитуды сигнала. В то же время для смесей богаче 0,9 и беднее 1,1 увеличение амплитуды ионного тока в начальной фазе сгорания произошло значительно меньше и составило около 10%, следовательно, ухудшение условий горения, вследствие ухода из зоны максимальной скорости распространения пламени по составу смеси приводит к меньшему влиянию турбулентности на скорость протекания химических реакций окисления во фронте пламени. Тем самым показывается, что наиболее эффективный способ расширить эффективные границы устойчивого горения и работы двигателя является применение активирующих процесс окисления добавок в

топливо, наиболее перспективной в настоящее время является добавка водорода.

Глава 4 Оценка возможностей регулирования процесса сгорания по датчикам ионизации

4.1 Контроль и регулирование процесса сгорания по ионному току в заключительной фазе сгорания

Выполнение всё ужесточающихся законодательных норм токсичности отработавших газов автотранспорта при сохранении мощностных и экономических показателей, может быть осуществлено при обеспечении максимальной полноты сгорания топливовоздушной смеси (ТВС) вблизи верхней мертвой точки (ВМТ). Для этого следует иметь возможность контроля и регулирования процесса сгорания ТВС в поршневом ДВС.

Определение изменения температуры в процессе сгорания реального двигателя является очень сложным и дорогостоящим. Это связано в первую очередь с нестационарностью и скоротечностью процесса горения в камере сгорания (КС) поршневого двигателя внутреннего сгорания. Тепловой расчет по методике И.И. Вибе, с использованием экспериментальных данных, полученных с помощью ионизационного датчика, позволяет определить с хорошей достоверностью, характер сгорания и среднюю температуру в цилиндре двигателя.

В основе теплового расчета по методике И.И. Вибе лежит полуэмпирическое уравнение характеристики тепловыделения в зависимости от безразмерного времени t/t_z, отсчитываемого от момента воспламенения: $\chi = 1 - \exp \ln(1 - \chi_z)*(t/t_z)^{m+1}$. Особенности процесса сгорания учитываются в уравнении показателем характера сгорания m, однозначно определяющим положение максимума безразмерной скорости тепловыделения [2].

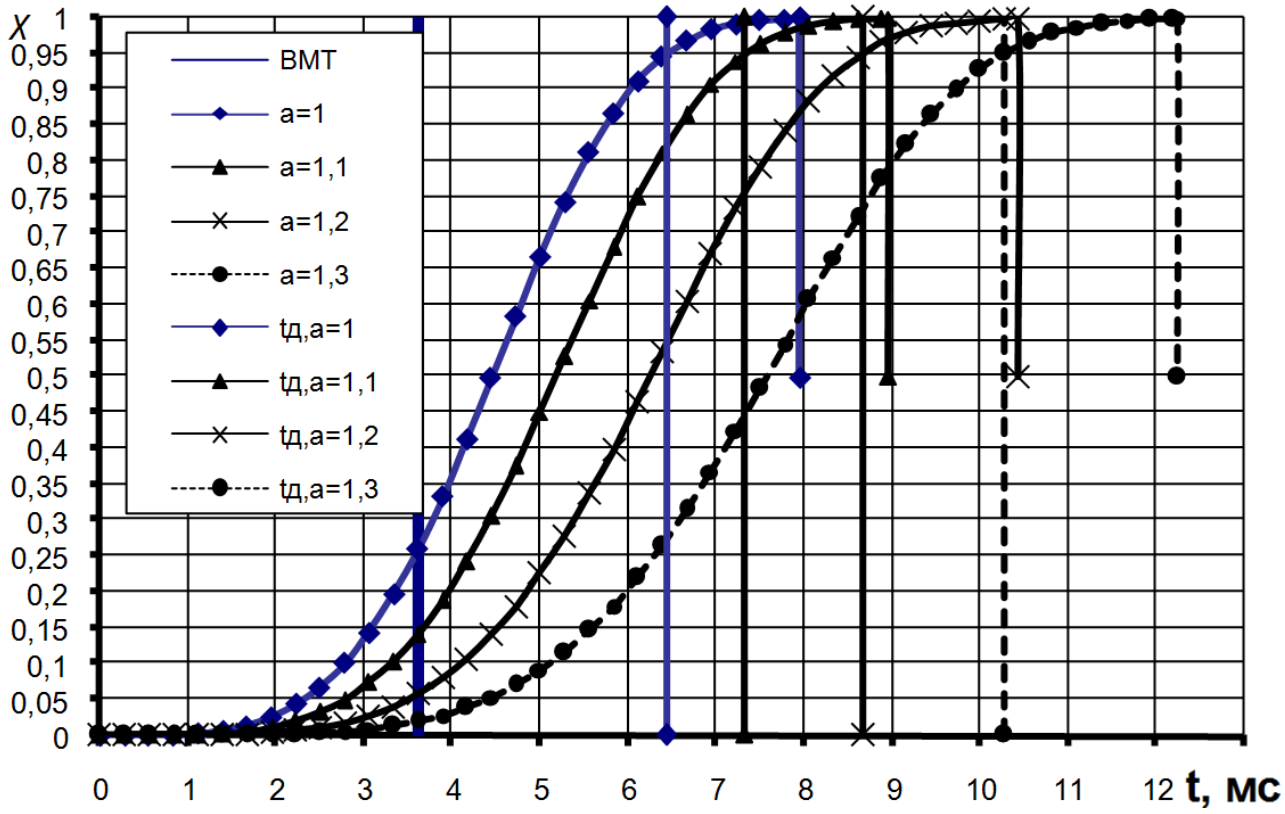

Рисунок 4.1 - Характеристика тепловыделения при сгорании бензовоздушной смеси в УИТ-85 при частоте вращения 600 мин$^{-1}$ в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Так как характеристика тепловыделения χ является функцией продолжительности сгорания и показателя характера сгорания *m,* то, зная продолжительность сгорания и то, что в момент прихода пламени на датчик выгорело 95% ТВС, находим показатель характера сгорания *m*, как показано на рисунке 4.1. Где каждому режиму принадлежат 3 линии, одного типа, характеристика тепловыделения, время возникновения тока на ионизационном датчике, и линия, отмечающая окончание сгорания. Определённые таким образом показатели характера сгорания *m* показали, существование линейной зависимости *m* от амплитуды ионного тока, которая показана на рисунке 4.2.

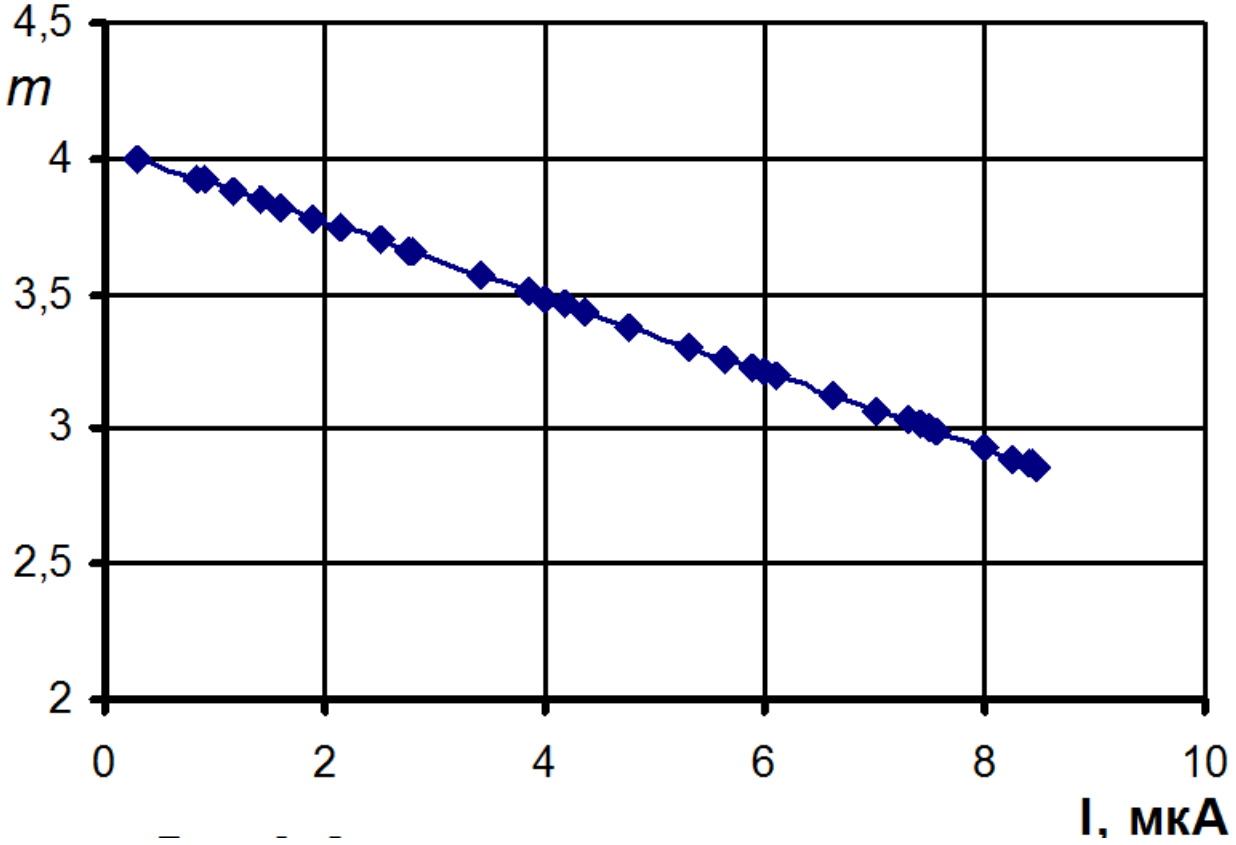

Рисунок 4.2 - Зависимость показателя сгорания m, характеристики тепловыделения Вибе, от амплитуды ионного тока в УИТ-85 при угле опережения зажигания 13 ^{0} ПКВ

Анализ результатов, полученных при изменении физико-химических свойств топлива, показал, что с добавлением водорода наблюдается рост максимума температуры, и достижение этого максимума за более короткий промежуток времени. Этот рост тем заметнее, чем более обедненной становится ТВС, что показано на рисунке 4.3 и рисунке 4.4. В смеси постоянного состава наибольший прирост температуры наблюдается при добавке 1% водорода. С увеличением количества добавляемого водорода интенсивность прироста температуры постоянно уменьшается. Объяснение в том, что добавляя водород приходится уменьшать количество бензина, тем самым уменьшая низшую теплотворную способность горючей смеси. Рост температуры объясняется следующим образом.

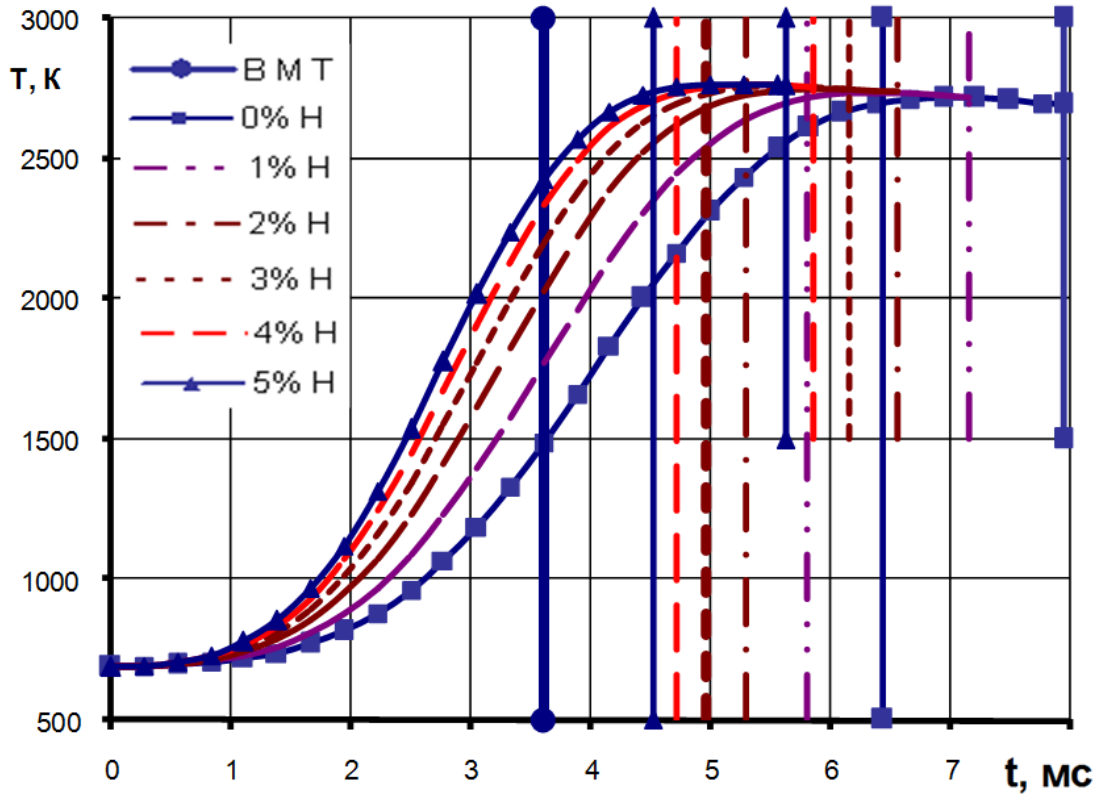

Рисунок 4.3 - Влияние добавки водорода на температуру в процессе сгорания в УИТ-85 при угле опережения зажигания 13 ^{0} ПКВ, и составе смеси α = 1

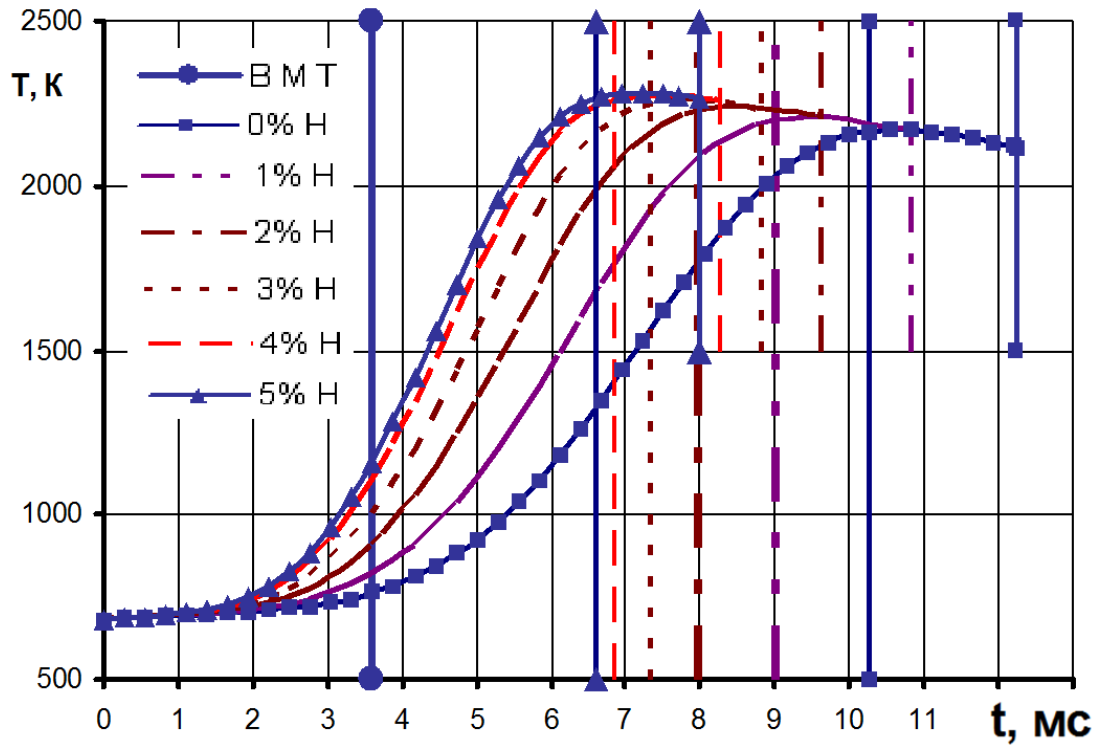

Рисунок 4.4 - Влияние добавки водорода на температуру в процессе сгорания в УИТ-85 при угле опережения зажигания 13 ^{0} ПКВ, и составе смеси α = 1,3

Усиление влияния добавки водорода на рост максимальной температуры при обеднении смеси так же объясняется всё более существенным влиянием процесса расширения. Так если при α = 1 при добавке водорода 1, 3 и 5% увеличение объёма камеры сгорания в процессе горения ТВС составило 3.5, 1.4 и 0.7% по сравнению с минимальным объёмом камеры сгорания, то при α = 1,3 уже составило 20.6, 10 и 5,7%, соответственно, что показано на рисунке 4.5.

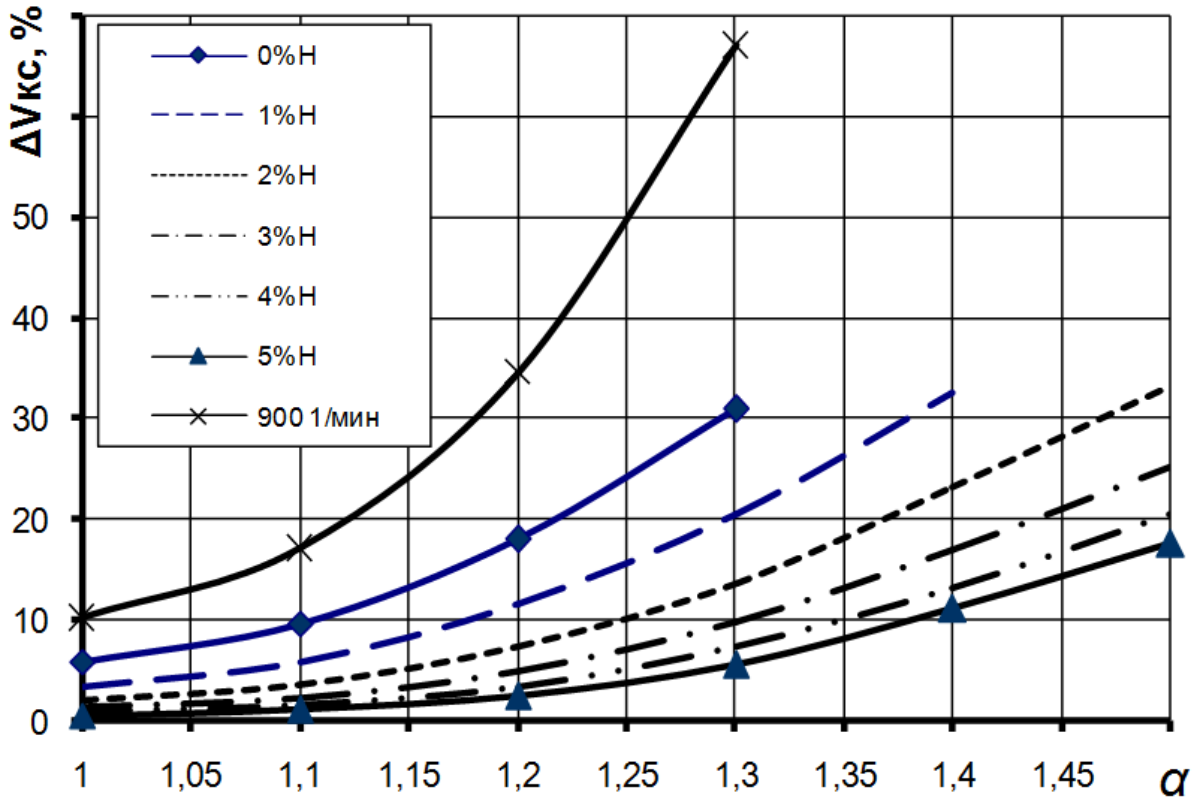

Рисунок 4.5 - Объем над поршневого пространства в момент появления тока на ионизационном датчике в зависимости от количества добавляемого водорода и частоты вращения в УИТ-85 при угле опережения зажигания 13 ^{0} ПКВ

Анализ результатов теплового расчета, полученных при изменение скоростного режима, показал, что при увеличении оборотов двигателя с 600 до 900 об/мин, при постоянном угле опережения зажигания θ_z = 13˚ поворота коленчатого вала (ПКВ), происходит небольшое уменьшение максимальной

температуры, как показано на рисунке 4.6. Причина в том, что время достижения пламенем датчика ионизации уменьшилось в 1.31 раза, следовательно, средняя скорость распространения пламени увеличилась в этой же пропорции, а угловая скорость кривошипа увеличилась в 1.5 раза.

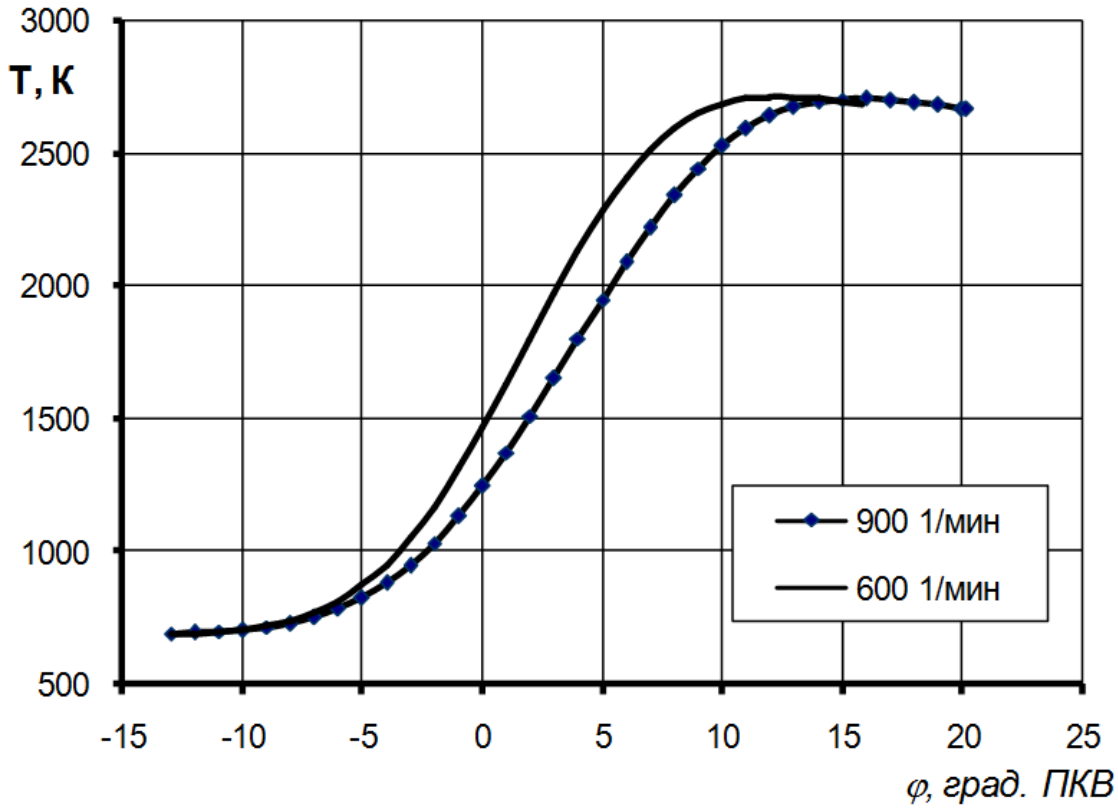

Рисунок 4.6 - Влияние частоты вращения на температуру в процессе сгорания бензовоздушной смеси в УИТ-85 при угле опережения зажигания 13 ^{0} ПКВ, и составе смеси α = 1

В итоге протяженность процесса сгорания по углу поворота кривошипа, с ростом оборотов с 600 до 900 об/мин увеличилась на 15,3 %. Поэтому, как показано на рисунке 4.7, основная фаза сгорания на 900 об/мин, оказывается смещенной в процесс расширения. Следовательно, сгорание ТВС завершается при несколько большем объеме камеры сгорания, сопровождающееся уменьшением максимальной температуры, по сравнению с соответствующей температурой при 600 об/мин.

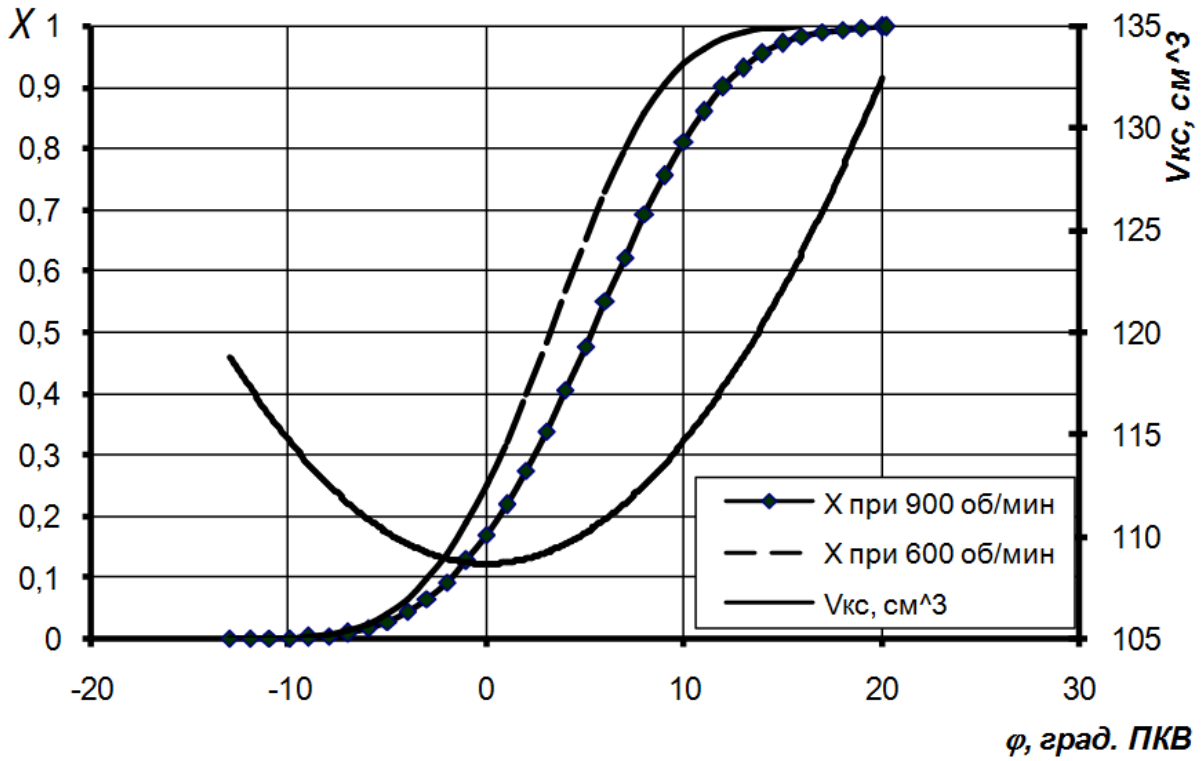

Рисунок 4.7 - Влияние расширения на процесс сгорания бензовоздушной смеси в УИТ-85 при угле опережения зажигания 13 ^{0} ПКВ, и составе смеси α = 1

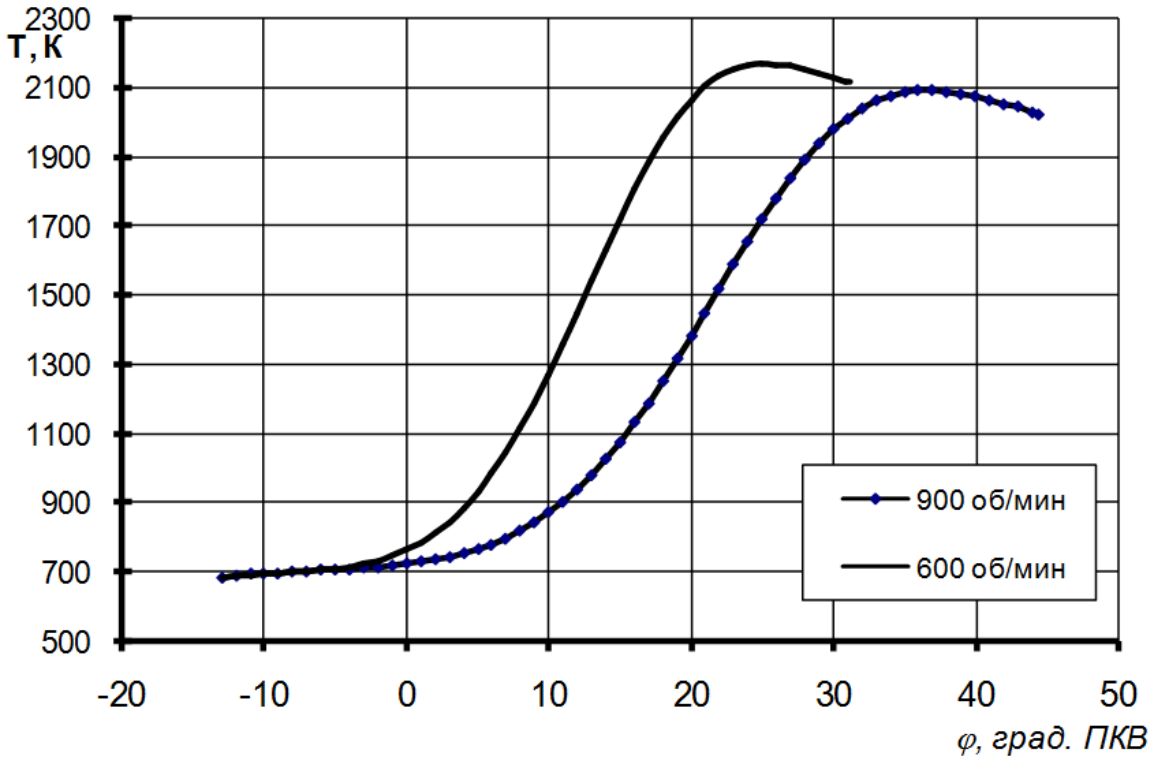

Рисунок 4.8 - Влияние оборотов на температуру в процессе сгорания бензовоздушной смеси в УИТ-85 при угле опережения зажигания 13 ^{0} ПКВ, и составе смеси α = 1,3

Рассматривая изменение температуры в процессе сгорания при α = 1,3 рисуное 4.8, видно, что увеличение средней скорости распространения пламени в основной фазе составило 14%, а угловая скорость возросла на 50%. В связи с этим, влияние расширения на максимальную температуру в процессе сгорания стало более значимым. Так разница максимальных температур на 600 и 900 об/мин при α = 1 составила всего 8 К, в то время как при α = 1,3 уже составила 74 К.

Использование при математическом моделировании эмпирических и полуэмпирических методов обуславливает неточности и не полную проработанность химии горения углеводородов. Данные методы основаны на обработке значительного количества экспериментальных данных и позволяют уточнять и калибровать математические модели, полученные аналитическим путем. Использование явления электропроводности пламени углеводородов позволяет получить экспериментальные данные, которые могут быть использованы для разработки и уточнения математических моделей сгорания. А именно, с помощью явления электропроводности пламени возможно получение информации конфигурации и скорости распространения фронта пламени в камере сгорания, а, следовательно, об интенсивности химических реакций. Кроме того, проводятся исследования с целью оценки возможности получения информации о химических реакциях во фронте пламени, о состоянии топливно-воздушной смеси и термодинамических параметрах цикла с помощью измерения ионного тока в камере сгорания ДВС. Ионным током в данном случае называется ток, протекающий между разнополярными электродами, омываемыми пламенем углеводородного топлива.

Кроме математического моделирования рабочего процесса, эта же информация, полученная в режиме реального времени на двигателе, может быть использована в системах адаптивного управления двигателем для улучшения показателей экономичности и токсичности.

Могут быть применены две электрические цепи, питающие свечу зажигания с разными источниками питания. Одна цепь используется для создания искрового разряда, а вторая для возбуждения ионного тока в искровом промежутке цепи.

Кроме того, весьма интересной представляется схема, в которой 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 негомогенностью 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. Однако для получения адекватной информации сигнал со свечи зажигания должен быть подвергнут достаточно сложной обработке.

Примерно с середины прошлого века имеются публикации о попытках исследований взаимосвязи электропроводности пламени с различными параметрами горения. Получены закономерности, связывающие значения нормальной скорости распространения пламени с величиной ионного тока. Причем ток ионизации измерялся в ламинарных пламенах на бунзеновской горелке, в условиях сферической бомбы с центральным зажиганием и двигателя внутреннего сгорания. При этом варьировались различные значащие факторы, такие как состав смеси, разбавление инертными газами и др.

В современных исследованиях отражено наличие взаимосвязи ионного тока с некоторыми параметрами процесса сгорания в условиях поршневого ДВС с искровым зажиганием. В основном с помощью измерений ионного тока в искровом промежутке свечи зажигания диагностируются пропуски

зажигания. Также показывается возможность оценки загрязнений свечи зажигания, а также калильного зажигания с помощью цифровой обработки сигналов ионного тока. Для этого оценивается амплитуда сигнала ионного тока, которая зависит от величины сопротивления электродов свечи зажигания. В публикациях высказываются предположения о возможности анализа термодинамических характеристик рабочего процесса с помощью анализа изменения сигнала ионного тока. Предлагается информацию, полученную в ходе экспериментов с ионизационным датчиком, использовать для уточнения параметров полуэмпирических моделей тепловыделения в камере сгорания двигателя.

Кроме того, в исследованиях предполагается оценивать состав смеси (соотношение топливо-воздух) с помощью анализа сигнала ионного тока.

4.2 Взаимосвязь электропроводности пламени с составом смеси, режимами работы двигателя (ε, n) и качеством ТВС

Опытные точки изменения амплитуды полученного сигнала в зависимости от массовой доли добавляемого водорода при различных составах ТВС, представлены на рисунке 4.9. Из графика видно, что характер зависимости амплитуды импульса от состава ТВС имеет вид, описанный ранее, т.е. наибольшие значения находятся в области обогащенных и стехиометрических смесей и далее с обеднением монотонно линейно убывает.

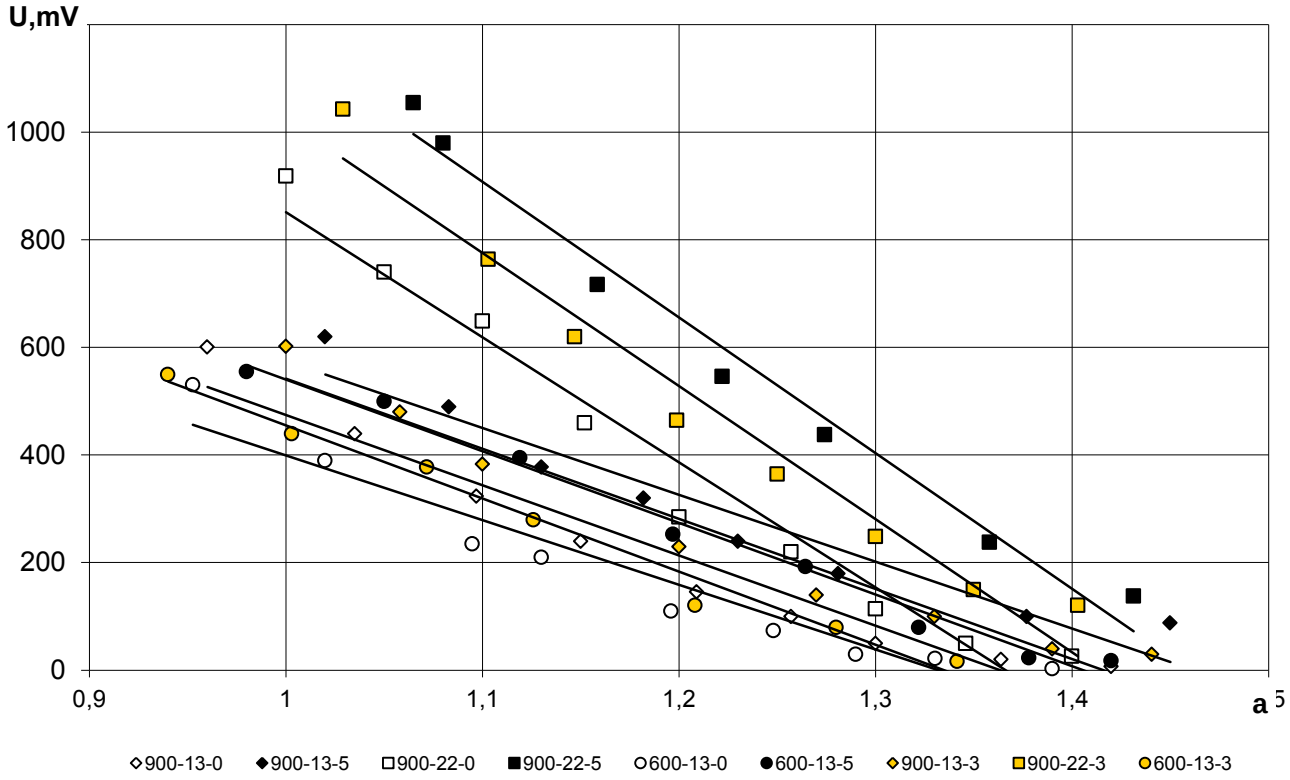

Рисунок 4.9 - Экспериментальная оценка взаимосвязи величины изменения напряжения при различных составах ТВС с добавкой водорода

Подытожим выше сказанное. Из приведенных данных видно, что амплитуда величины изменения напряжения ионного тока меняется в зависимости от состава ТВС, скоростного режима, регулировочных параметров, доли добавляемого водорода. Наглядно видно, что с изменением УОЗ амплитуда сигнала существенно возрастает при сохранении скоростного режима на постоянном уровне.

4.3 Взаимосвязь электропроводности пламени со средней скоростью распространения пламени

Для дальнейшего анализа взаимосвязи электропроводности пламени и параметров эффективности токсичности рабочего процесса произведена оценка скорости распространения пламени.

В настоящей работе определено время распространения пламени от свечи зажигания до датчика ионизации и время существования горения в полости датчика. Т.к. датчик находится в наиболее удаленной от свечи зажигания области КС, т.е. диаметрально противоположно ей, а камера сгорания имеет цилиндрическую конструкцию без вытеснителей, завихрителей и т.д., то промежуток времени до появления импульса ионного тока соответствует выгоранию основной части заряда.

Скорость сгорания – важнейший параметр рабочего процесса ДВС, определяющий показатели эффективности и токсичности. В данной работе определена продолжительность «основной» фазы сгорания, соответствующей распространению фронта пламени практически через весь объем камеры сгорания. Скорость пламени при сохранении скоростного режима двигателя, т.е. степени турбулизации заряда, может изменяться при изменении физико-химических свойств ТВС. Физико-химические свойства смеси, т.е. состав, степень разбавления остаточными газами, наличие активизирующей добавки оказывают значительное влияние на скорость распространения ламинарного пламени.

Промежуток времени t от искрового разряда до начала импульса проводимости на датчике ионизации, позволяет оценить значения средней скорости пламени в «основной» фазе сгорания. Для этого достаточно поделить характерный размер КС, соответствующий пути распространения фронта пламени на время t:

$$V(м/с) = D(мм)/t(мс), \qquad (4.1)$$

где D = 85 мм, – диаметр цилиндра.

Полученные значения средних скоростей пламени близки к значениям, полученным при сходных условиях в известных работах [1,29,30]. При этом характер взаимосвязи средних скоростей распространения пламени от

состава смеси соответствует характеру взаимосвязи времени начала импульса от состава смеси и изменения качества смеси.

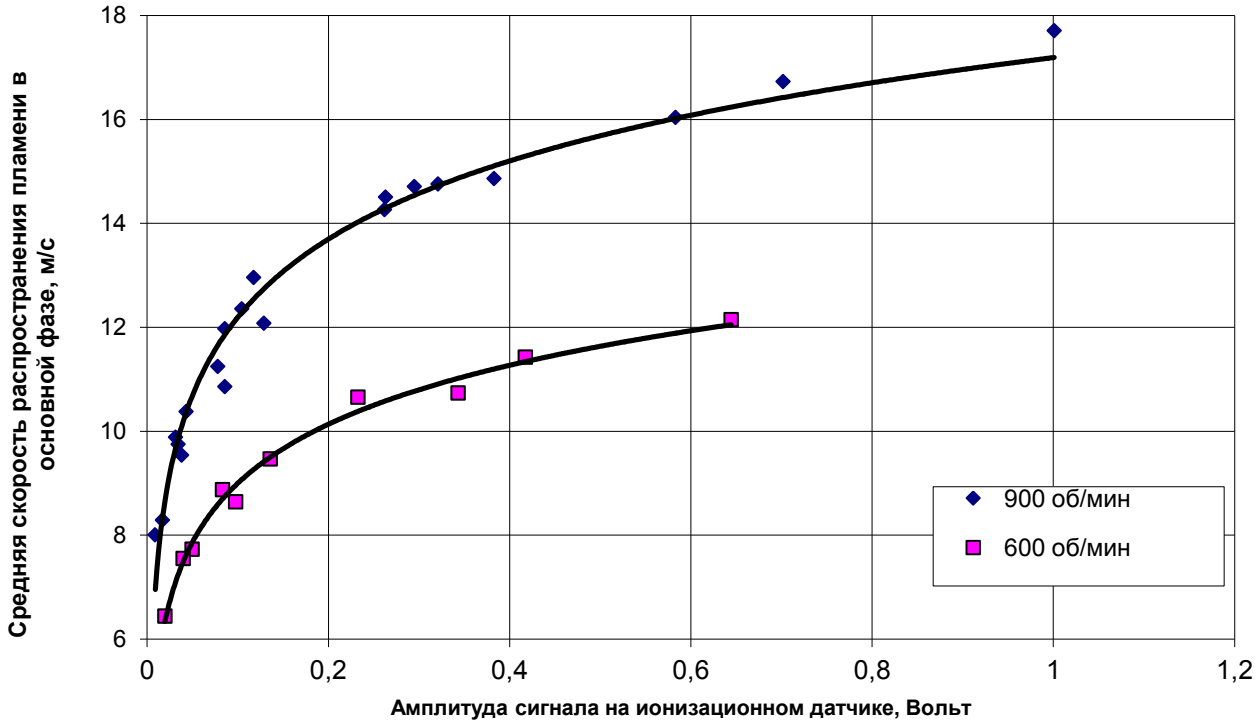

Рисунок 4.10 - Взаимосвязь электропроводности пламени со средней скорости распространения пламени, без добавок водорода, для УИТ-85 при УОЗ=9, 13, 16, 22, 26 и 29 град.пкв.

На рисунке 4.10 приведена взаимосвязь электропроводности пламени со средней скорости распространения пламени. Из взаимосвязи можно наблюдать, что для режимов с амплитудой сигнала более 0.2 Вольта, соответствующим составам смеси от α= 0.9 до 1.2, наблюдается линейная зависимость амплитуды сигнала от средней скорости распространения пламени в основной фазе сгорания, для всех исследуемых УОЗ.

4.4 Взаимосвязь электропроводности пламени с эффективностью работы бензинового двигателя

Интегрирование показаний магнитострикционного датчика позволило построить индикаторные диаграммы по давлению в вольтах отражающие

реальное изменение давления в цилиндре двигателя. На рисунке 4.11 приведены результата экспериментальных исследований на магнитострикционном датчике по выявлению зависимости изменения давления в цилиндре двигателя от состава смеси, для определения корреляции полученных результатов с характеристиками электропроводности пламени. Рисунок 4.11 показывает влияние состава смеси на максимальное давление в цилиндре двигателя, отражающее эффективность протекания процесса сгорания. Из рисунка 4.12 видно, что с обеднением смеси максимальное давление, а, следовательно, и работа цикла уменьшаются, это связано с уменьшением удельной теплоты веденной в цилиндр двигателя, а также с увеличением продолжительности процесса сгорания по времени, и проведение его на стадии расширения при большем объеме, снижающем КПД цикла. Для системы контроля и управления важным параметром является определение эффективности протекания процесса сгорания, и, следовательно, величина максимального давления в цилиндре двигателя.

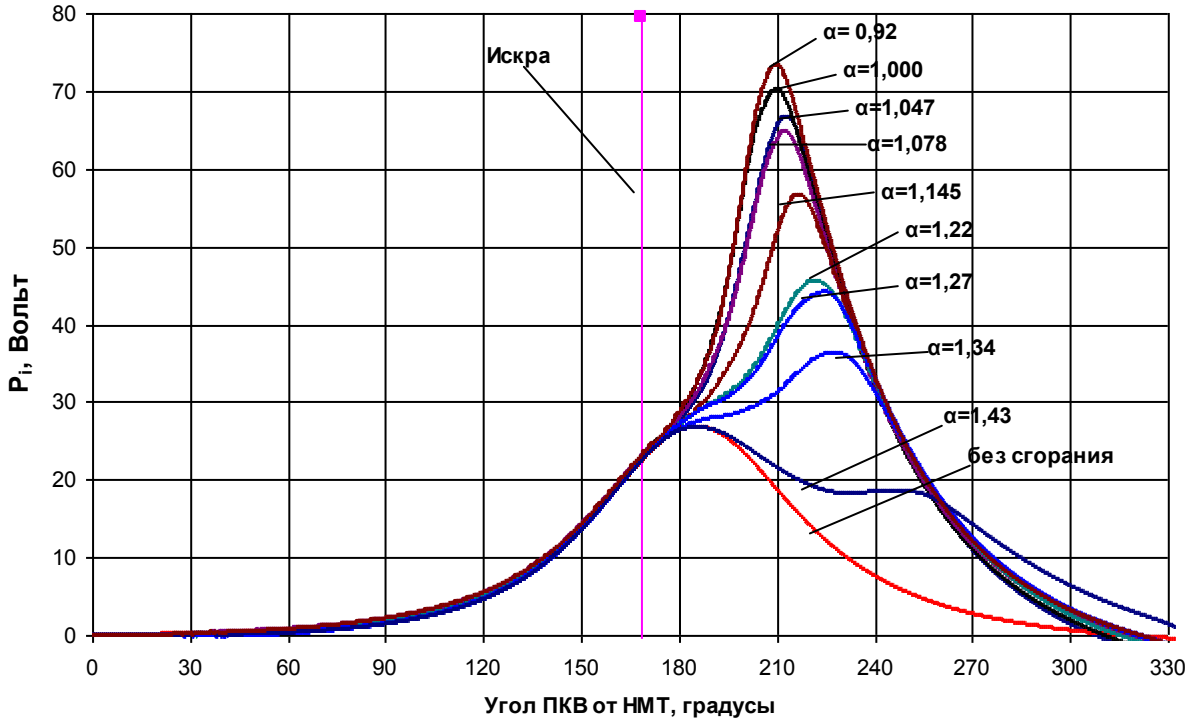

Рисунок 4.11 - Исследование давления в цилиндре двигателя УИТ – 85 при изменении состава смеси, режим работы 900 мин$^{-1}$, УОЗ = 13 град. ПКВ.

Амплитуда ионного тока является характеристикой отражающая протекание процесса сгорания в цилиндре двигателя. На рисунке 4.13 показана зависимость максимального давления, и амплитуды ионного тока от состава смеси в УИТ – 85, режим работы 900 мин$^{-1}$, УОЗ = 13 град. ПКВ. Анализ данной зависимости показал наличие явной корреляции между максимальным давлением в цилиндре двигателя и амплитудой ионного тока на ионизационном датчике. На рисунке 4.14 приведена взаимосвязь максимального давления в цикле и амплитуды ионного тока, которая показывает возможность оценки эффективности работы двигателя по амплитуде ионного тока. Как видно из рисунков 4.13 и 4.14 максимальное давление в цикле отражает работу цикла, а, следовательно, и эффективность организации рабочего процесса.

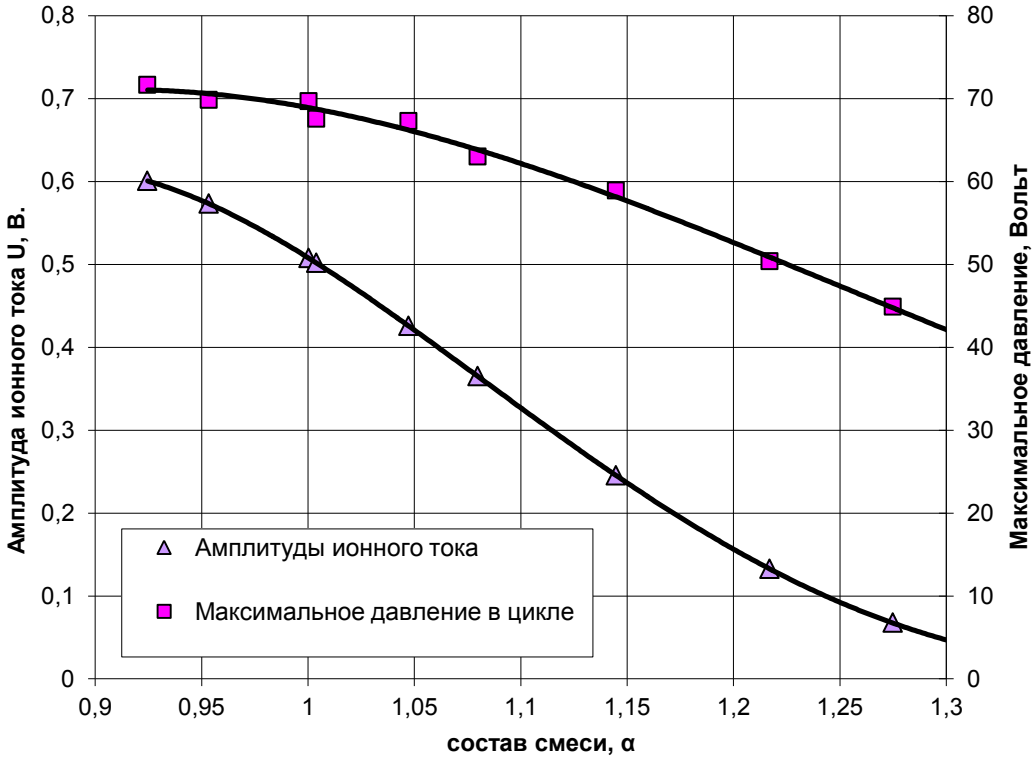

Рисунок 4.12 - Зависимость максимального давления и амплитуды ионного тока от состава смеси в УИТ – 85, режим работы 900 мин$^{-1}$, УОЗ = 13 град. ПКВ.

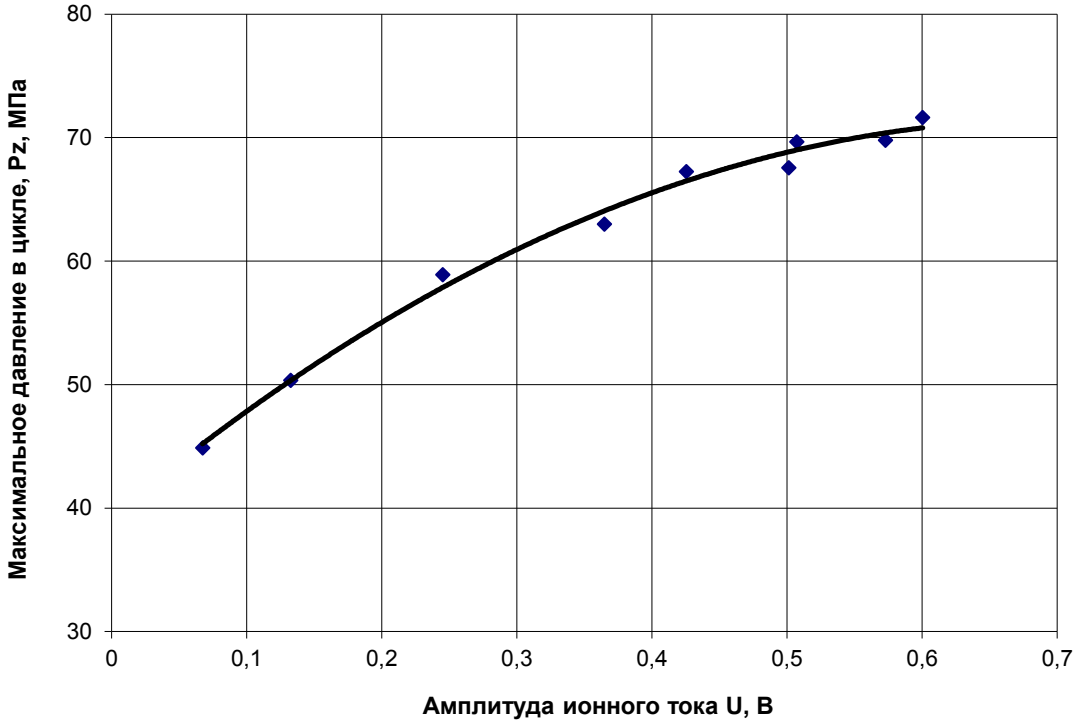

Рисунок 4.13 - Взаимосвязь максимального давления в цикле и амплитуды ионного тока, в УИТ – 85, режим работы 900 мин$^{-1}$, УОЗ = 13 град. ПКВ.

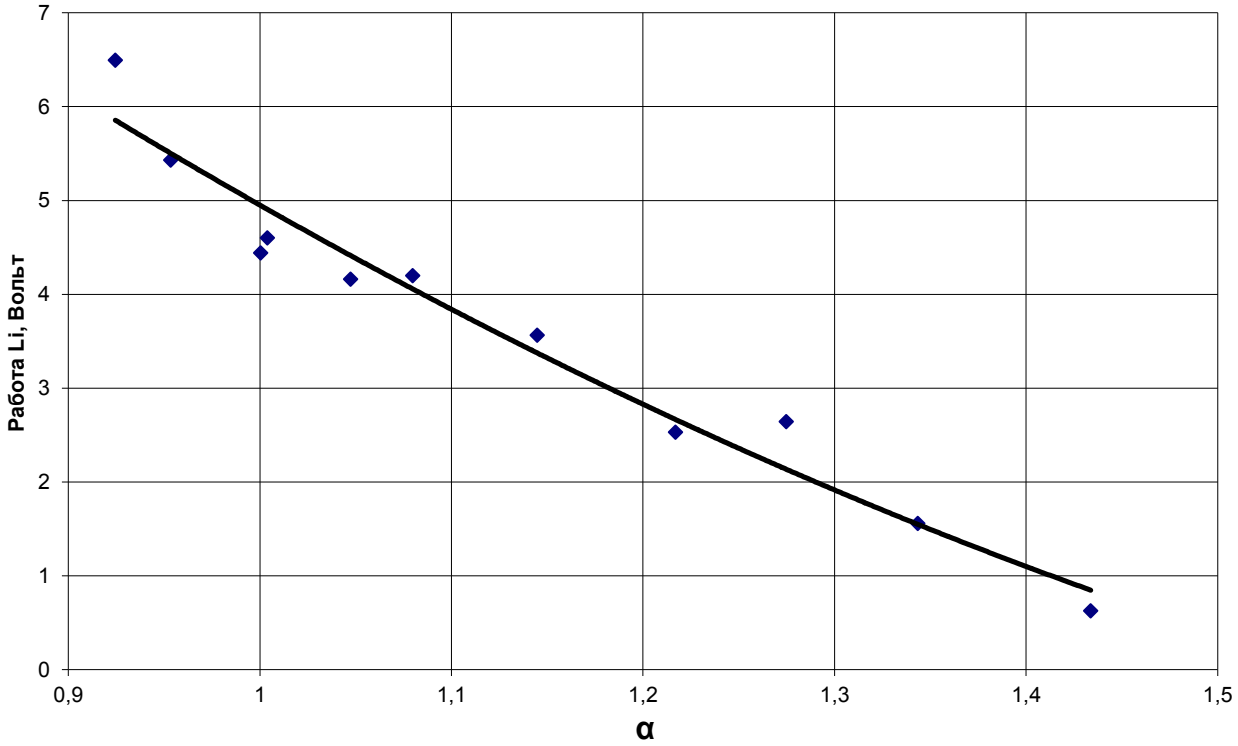

Рисунок 4.14 - Взаимосвязь работы в цикле от состава смеси в УИТ – 85, режим работы 900 мин$^{-1}$, УОЗ = 13 град. ПКВ.

Полученные результаты на основе эффективности работы двигателя показывают большие преимущества разрабатываемой системы контроля основанной на явлении электропроводности в пламени, работающей на всем диапазоне бедных смесей при непосредственном анализе процесса сгорания, над существующими системами использующие в которых, во первых лишь косвенные показатели характеризующие протекание сгорания, и во-вторых работающие в узком диапазоне вблизи $\alpha=1$ обеспечиваемый λ-зондом (датчика кислорода).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы могут быть представлены следующими выводами:

Выявленные зависимости, связывающие электропроводность пламени с основными характеристиками работы двигателя позволяют определять следующие параметры:

- Состав смеси линейно зависит от электропроводности пламени в диапазоне $\alpha \geq 1$ при изменении качества ТВС, т.е. данная зависимость справедлива и для других видов топлива.
- Средние скорости распространения пламени в основной и заключительной фазах имеют линейные зависимости от электропроводности пламени в диапазоне от $\alpha=0.9$ до $\alpha=1.3$, причем подобные результаты справедливы и для других видов топлива.
- Электропроводность пламени однозначно определяет массовую продолжительность основной фазы сгорания, т.е. продолжительность активного тепловыделения в процессе сгорания.
- Электропроводность пламени однозначно определяет продолжительностью всего процесса сгорания.
- Получена зависимость величины максимального давления в цилиндре двигателя от электропроводности пламени, которая линейна в диапазоне от $\alpha=0.9$ до $\alpha=1.3$, причем подобные результаты справедливы и для других видов топлива.
- Выявлена взаимосвязь электропроводности пламени с работой цикла ДВС, показано, что работы в цикле можно оценивать в первом приближении по величине максимального давления в цикле, а, следовательно, и по электропроводности пламени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вибе И.И., Тепловой расчёт двигателей внутреннего сгорания [Текст] / И.И. Вибе // Челябинск.: Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, 1972. - с.282
2. 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.
3. 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.
4. 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. Свердлов //Тез. XII симпозиума по горению и взрыву, 11-15 сентября 2000 г. Черноголовка: РАН, 2000.- ч.3. - с.155-157.
5. 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.
6. 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.
7. Franke, A. Employing an ionization sensor for combustion diagnostics in a learn burn natural gas engine [Text] / A. Franke, P. Einewall, B. Johansson, R. Reinmann // SAE paper № 2001-01-0992, 2001.
8. 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.

9. Grill, M. Objektorientierte Prozessrechnung von Verbrennungsmotoren [Текст] / M.Grill // Stuttgart, Universität, Dissertation. 2006a.
10. Gülder, Ö. L. Turbulent Premixed Combustion Modelling using Fractal Geometry [Текст] / Ö.L. Gülder // in: 23. Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute. 1990.
11. Herdin, G. Emissionsproblematik bei Biogasmotoren [Текст] / G.Herdin // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007.
12. 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.
13. Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals [Текст] / J. B. Heywood// New York: McGraw-Hill. 1988.
14. Hiroyasu, H. Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber [Текст] / H. Hiroyasu, T. Kodata // SAE Paper 740715. 1974.
15. 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.
16. Jobst, J. Simulation von Zündverzug, Brennrate und NOx-Bildung für direktgezündete Gasmotoren [Текст] / J. Jobst, F. Chmela, A. Wimmer // in: 1. Tagung Motorprozesssimulation und Aufladung. Berlin. 2005.
17. 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.
18. Kettner, M. Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Optimierung der Entflammung von mageren Gemischen bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung [Текст] / M. Kettner // Karlsruhe, Universität, Dissertation. 2006.

19. Klimstra, J. The road to obtain the ultimate performance of gas engines - opportunities and challanges [Текст] / J. Klimstra // in: 5. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau. 2007.
20. 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.
21. Kogler, G. Potential of HCCI for large natural gas fueled engines [Текст] / G. Kogler, A. Wimmer // in: CIMAC Congress. Wien. 2007.
22. Kolb, T. Experimentelle und theoretische Untersuchung zur Minderung der NOx-Emission technischer Feuerungen durch gestufte Verbrennungsführung [Текст] / T. Kolb // Karlsruhe. Technische Hochschule, Dissertation. 1990.
23. Kozuch, P. Ein phänomenologisches Modell zur kombinierten Stickoxid- und Rußberechnung bei direkteinspritzenden Dieselmotoren [Текст] / P. Kozuch // Stuttgart, Universität, Dissertation. 2004.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Merker, G. Technische Verbrennung - Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse [Текст] / G. Merker, Ch. Schwarz // Stuttgart: Teubner. 2001.

29. 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.
30. Noske, G. Ein quasidimensionales Modell zur Beschreibung des ottomotorischen Verbrennungsablaufes [Текст] / G. Noske // Düsseldorf: VDI Verlag. 1988.
31. Zacharias, F. Gasmotoren [Текст] / F. Zacharias // Würzburg: Vogel. 2001.