

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(наименование профиля магистерской программы)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Взаимосвязь основных характеристик сгорания с химической
ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС

Студент(ка)

А. У. Мавлобахшов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

А.П. Шайкин

(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

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

«ЭМиСУ»

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2018 г.

Тольятти 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1 Особенности распространения пламени в ДВС с искровым зажиганием	6
1.1 Современные представления о турбулентной скорости распространения пламени в предварительно перемешанной смеси ...	6
1.1.1 Первая фаза сгорания	7
1.1.2 Вторая фаза сгорания	8
1.1.3 Основная фаза сгорания	10
1.1.4 Третья фаза сгорания	11
1.2 Особенности, накладываемые на распространение пламени в ДВС с искровым зажиганием.....	12
1.2.1 Влияние давления в цилиндре двигателя на скорость распространения пламени	12
1.2.2 Влияние температуры в цилиндре двигателя на скорость распространения пламени	13
1.2.3 Влияние турбулентности в цилиндре двигателя на скорость распространения пламени	14
1.2.4 Влияние конструкции камер сгорания на характеристики течения и турбулентности ТВС в двигателе	16
1.2.5 Влияние объема завершения сгорания на скорость распространения пламени	19
1.3 Хемионизация в углеводородном пламени	19
1.4 Экспериментальные зависимости ионного тока от состава смеси, вида топлива, добавки промотора горения водорода	30
1.5 Ионизация в пламени углеводородного топлива	31
1.6 Заключение по 1-ой главе.....	33
ГЛАВА 2 Экспериментальное оборудование и методика проведения и	

обработки результатов испытаний	35
2.1 Описание основной экспериментальной установки	35
2.2 Методика проведения эксперимента	40
2.3 Исследование электропроводности факела пламени при сжигании неоднородной ТВС в прямооточных камерах сгорания.....	43
Глава 3 Исследование электропроводности факела пламени неоднородной углеводородной топливно-воздушной смеси	44
3.1 Исследование электропроводности факела пламени неоднородной смеси углеводородного топлива с воздушным потокм на моделях прямооточных камер сгорания	44
Глава 4 Хемионизация в пламени топливно-воздушной смеси в ДВС с искровым зажиганием	59
4.1 Зависимость интервала от момента подачи искры до появления сигнала на датчике, при варьировании составом топливно- воздушной смеси при работе на СПГ и СПГ с добавками водорода ...	59
4.2 Зависимость продолжительности сигнала электропроводности пламени от отношения воздуха к топливу и состава газового топлива характеризующимся изменением доли водорода в нем	62
4.3 Характеристики амплитуду сигнала электропроводности пламени	65
4.4 Зависимость ионного тока от состава бензоводородовоздушной смеси и частоте вращения КВ	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	71
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	72

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Процесс распространения пламени, является основным процессом определяющим термодинамические, индикаторные и экологические параметры работы двигателя. В связи с чем, активные исследования процесса сгорания и распространения пламени никогда не прекращаются. Одним из важных параметров, характеризующий интенсивность протекание химических реакций окисления во фронте пламени является характеристика электропроводности пламени. Её ещё по-другому называют химической ионизацией зоны турбулентного горения. В связи с чем изучение взаимосвязей основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС, является актуальной задачей для проведения научных исследований.

Целью работы является выявление взаимосвязей основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС, для поиска возможностей повышения эффективности и стабильности процесса сгорания.

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

1. выявить взаимосвязь основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.
2. выявить возможности повышения эффективности и стабильности процесса сгорания на основе взаимосвязи основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.

Объект исследования: двигатели с искровым зажиганием.

Предмет исследования: зона горения в ДВС с искровым зажиганием.

Методы исследования. Применялись метод экспериментального анализа, методы эмпирического анализа и статистическая обработка данных.

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

Научная новизна исследования

Определена взаимосвязь основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.

Практическая значимость работы:

Выявленные возможности повышения эффективности и стабильности процесса сгорания на основе взаимосвязи основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.

На защиту выносятся:

1. экспериментальные данные, по влиянию характеристик распространения пламени на химическую ионизацию зоны турбулентного горения энергетических установок;
2. выявленные на основе анализа экспериментальных исследований взаимосвязи основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XXV Международной научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований» в 2018 г, г.Омск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 печатных работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 34 наименования. Работа изложена на 74 страницах машинописного текста, иллюстрированного 53 рисунками и 3 таблицами.

ГЛАВА 1 Особенности распространения пламени в ДВС с искровым зажиганием

1.1 Современные представления о турбулентной скорости распространения пламени в предварительно перемешанной смеси

Пламя, горение — это совокупности процесса сгорания или окисления при выделении тепла, свечении и наличия множества промежуточных реакций, проходящих по цепному механизму. Основной процесс окисления происходит в узкой полосе по законам ламинарного горения, то есть по цепочно-тепловому механизму, а турбулентные пульсации служат лишь для интенсификации подвода свежего материала в зону горения, а также для искривления поверхности ламинарного пламени и, следовательно, для увеличения интенсивности тепловыделения [1-15]. На рисунке 1.1 представлено схематическое изображение турбулентного фронта пламени в предварительно перемешанной смеси при сильной и слабой интенсивности турбулентности [16-18].

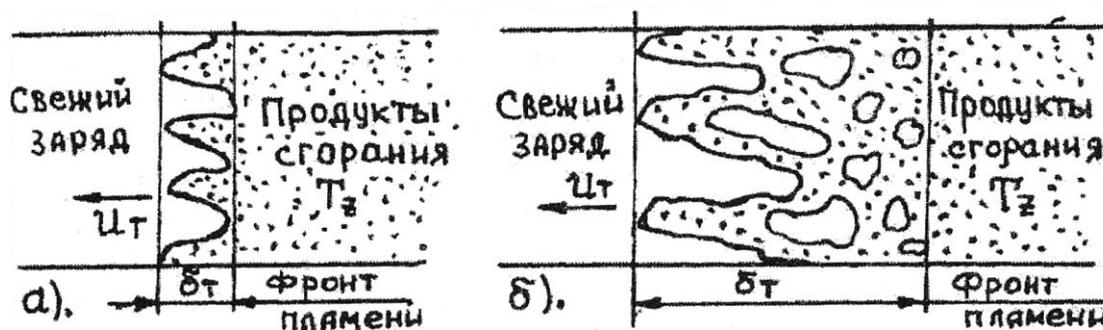


Рисунок 1.1 – Схема распространения турбулентного фронта пламени [66]:

а) слабая турбулентность; б) сильная турбулентность

Соответственно, распространение фронта пламени в условиях поршневых ДВС с предварительно перемешанной смесью, или, как их еще называют в двигателях с искровым зажиганием с подачей топлива во

впускной трубопровод, это двигатели с распределенным впрыском, центральным впрыском или карбюраторные моторы, протекает в зависимости от параметров турбулентности, условий воспламенения и движения поршня, состава топливно-воздушной смеси и так далее. Поэтому, процесс сгорания для его более адекватного анализа следует разбивать на отдельные фазы сгорания, как это показано на рисунке 1.2.

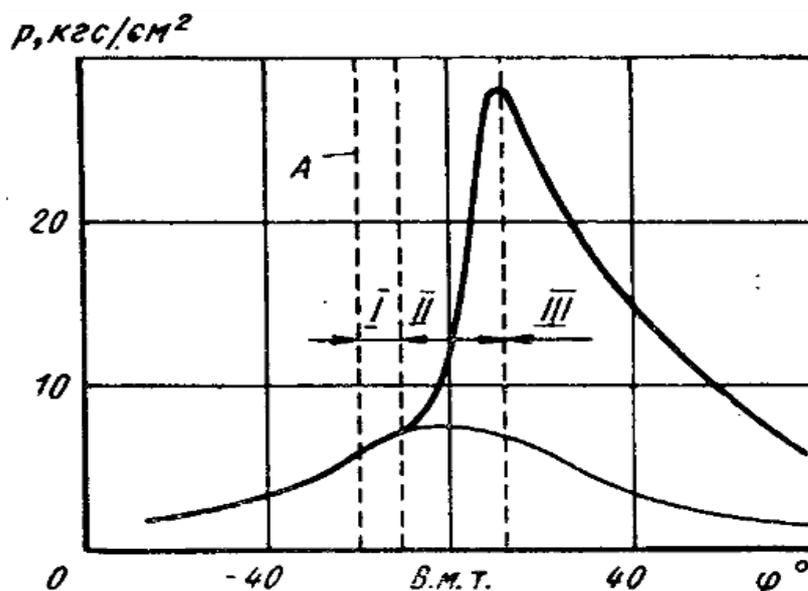


Рисунок 1.2 - Три фазы сгорания: I, II, III – фазы сгорания, A - момент зажигания

Такой подход позволяет проводить оценку закономерностей распространения фронта пламени при более равных условиях характерных каждой из фаз сгорания.

1.1.1 Первая фаза сгорания

Инициация или начало процесса сгорания происходит в первой фазе, как это показано на рисунке 1.3. В этом случае процесс горения инициируется искровым разрядом между электродами свечи зажигания, где формируется плазма, которая расширяясь подогревает соседние слои до температуры начала теплового процесса горения, а также насыщает их

активными радикалами являющимися центрами разветвленного механизма окисления углеводов.



Рисунок 1.3 - Формирование фронта пламени в первой фазе

При этом происходит теплоотвод от зоны перегретой плазмы в свежую смесь где тепло рассеивается, что приводит к снижению температуры начального очага горения при расширении. При этом в первой фазе имеет место два конкурирующих процесса, а именно, это процесс тепловыделения при расширении очага горения и процесс теплоотдачи в свежую смесь, и это приводит к тому, что температура очага горения снижается до тех пор, пока количество отданной теплоты в свежую смесь не станет меньше теплоты выделяемой от процесса горения, что характеризует образование устойчивого очага горения. Поэтому первую фазу сгорания еще называют фазой образования устойчивого очага горения.

1.1.2 Вторая фаза сгорания

После образования устойчивого очага горения происходит развитие и распространение фронта пламени по несгоревшей смеси в цилиндре двигателя, что и является по сути второй фазой сгорания. Механизм распространения фронта пламени в этой фазе в большей мере зависит от характера турбулентности, а уже потом только от условий распространения ламинарного фронта пламени, что характеризуется и подходами к

моделированию скорости распространения фронта пламени в этой фазе, так в работах [14,2,24,25,11] предложена следующая формула:

$$\frac{U_t}{U_n} = \sqrt{1 + \left(\frac{U'}{U_n}\right)^2}, \quad (1.1)$$

где U' – пульсационная скорость турбулентного потока, м/с;

U_n – нормальная скорость, м/с.

Karlowitz [26] дает следующие зависимости скоростей распространения турбулентного пламени:

- для слабой турбулентности:

$$U_T = U_H + U' \quad (1.2)$$

- для умеренной турбулентности:

$$U_T = U_H + \sqrt{2U_H U'} + \left[1 - \frac{U_H}{U'} \left(1 - e^{-\frac{U'}{U_H}}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

- для сильной турбулентности:

$$U_T = U_H + \sqrt{2U_H U'} \quad (1.4)$$

Анализ наиболее распространенных моделей распространения фронта пламени при турбулентном потоке показывает, ламинарная (нормальная) скорость распространения фронта оказывает существенное влияние на турбулентную скорость и только при высоких значениях турбулентности её влияние несколько ослабевает. Это показывает, что характеристики

распространения фронта пламени в условиях даже сильной турбулентности зависят от химического состава топливно-воздушной смеси и термодинамических параметров, связанных с закономерностью перемещения поршня в цилиндре двигателя [26].

1.1.3 Основная фаза сгорания

Основная фаза сгорания, это определение зоны сгорания от момента подачи искрового разряда, до сгорания основной массы топлива 90%, что составляет практически 94% объема свежей топливно-воздушно смеси и характеризуется её окончание достижением максимального давления в процессе сгорания. На рисунке 1.4 представлен механизм распространения развитого турбулентного фронта пламени по предварительно перемешанной смеси, характеризующий основные процессы, протекающие в основной фазе сгорания.

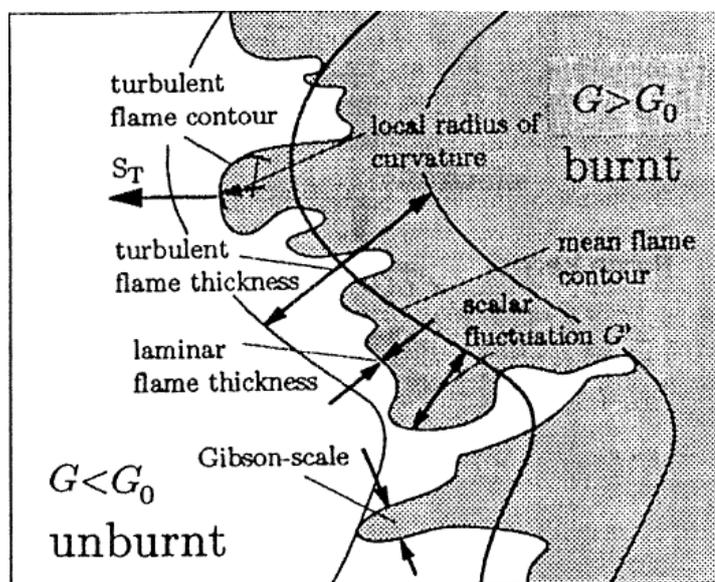


Рисунок 1.4 – Модель турбулентного горения [45]

На рисунке 1.5 показано схематичное изображение теплового механизма распространения ламинарного фронта пламени, характерного для

границы раздела свежей смеси и продуктов сгорания при движении турбулентного фронта пламени.

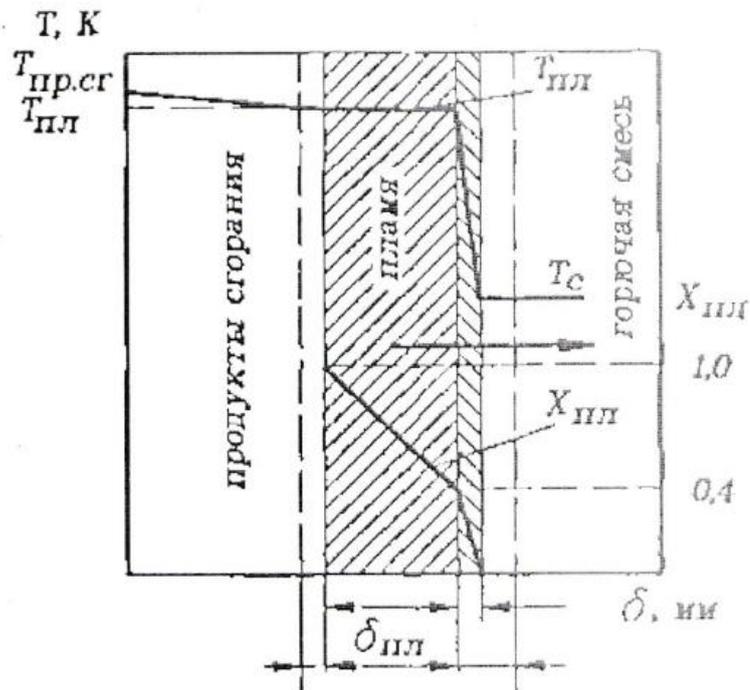


Рисунок 1.5 – Распределение температуры по зонам КС [104]

1.1.4 Третья фаза сгорания

Третья фаза сгорания фиксируется, согласно принятой методологии [6-19], как процесс догорания после достижения максимального давления в цилиндре двигателя до завершения процесса сгорания, которое характеризуется прекращением активного тепловыделения в цилиндре двигателя. Как уже отмечалось в оставшейся последней фазе сгорания сгорает 10% по массе и лишь 4-6% по объему оставшейся несгоревшей смеси, что в большей мере соответствует распространению фронта пламени в пристеночной зоне, поэтому в этой фазе сгорания характерно распространение фронта пламени при низких значениях турбулентности, которые характерны для пристеночной области камеры сгорания.

1.2 Особенности, накладываемые на распространение пламени в ДВС с искровым зажиганием

1.2.1 Влияние давления в цилиндре двигателя на скорость распространения пламени

Скорость распространения фронта пламени характеризуется изменением параметров, электропроводности которые отражают интенсивность протекания процессов окисления. Поэтому на рисунке 1.6 представлено исследование изменения характеристики электропроводности пламени в зависимости от распространения фронта пламени в камере сгорания при изменяющемся давлении и температуре.

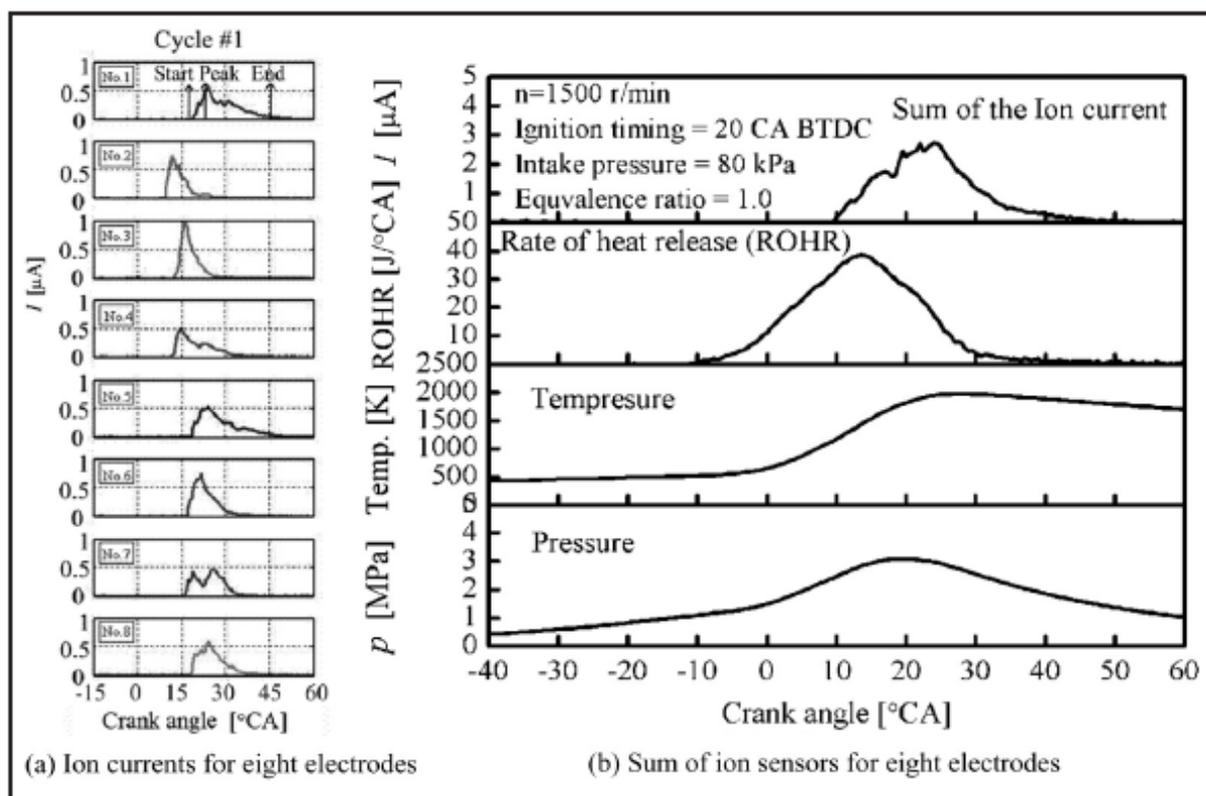


Рисунок 1.6 – Исследование изменения характеристики электропроводности пламени в зависимости от распространения фронта пламени в камере сгорания [22]

По анализу, проведенному в работе [22] подтверждено, что при увеличении давления происходит увеличение плотности смеси, что повышает гидродинамическую вязкость и тем самым снижает уровень турбулентных пульсаций, что характеризуется снижением скорости распространения фронта пламени при повышении давления (рисунок 1.7). Эти результаты соответствуют общеизвестным результатам [22-28] показывающим снижение, как ламинарной так турбулентной скорости распространения фронта пламени при увеличении давления в исследуемом процессе.

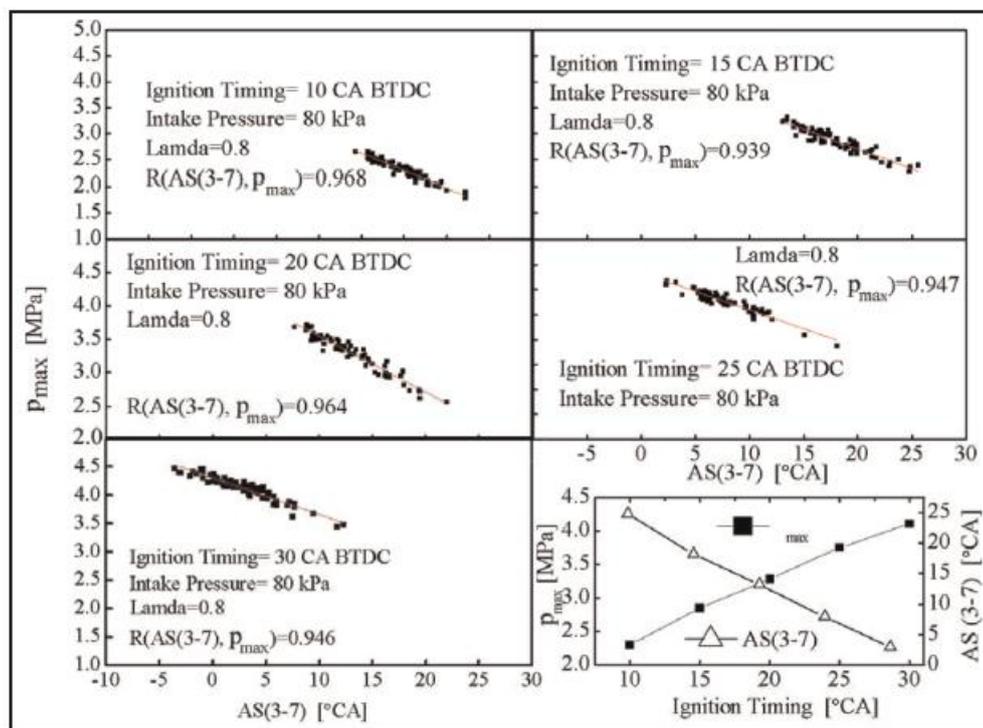


Рисунок 1.7 – Анализ проведенный в работе [22] показывающий снижение скорости сгорания при повышении давления

1.2.2 Влияние температуры в цилиндре двигателя на скорость распространения пламени

Температура в отличие от давления повышает скорость распространения пламени. Это связано с тем, что с ростом температуры

происходит рост внутренней энергии системы и атомов и молекул которые участвуют в процессе сгорания. тем самым обеспечивается большой запас энергии который позволяет химическим реакциям быстрее инициироваться и активнее начинать процесс окисления. Это соответствует результатам полученным, как в камере сгорания постоянного объема, так и в двигателях внутреннего сгорания [29-33].

1.2.3 Влияние турбулентности в цилиндре двигателя на скорость распространения пламени

Турбулентность характеризуется критерием подобия, числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{U_d}{\nu} \quad (1.5)$$

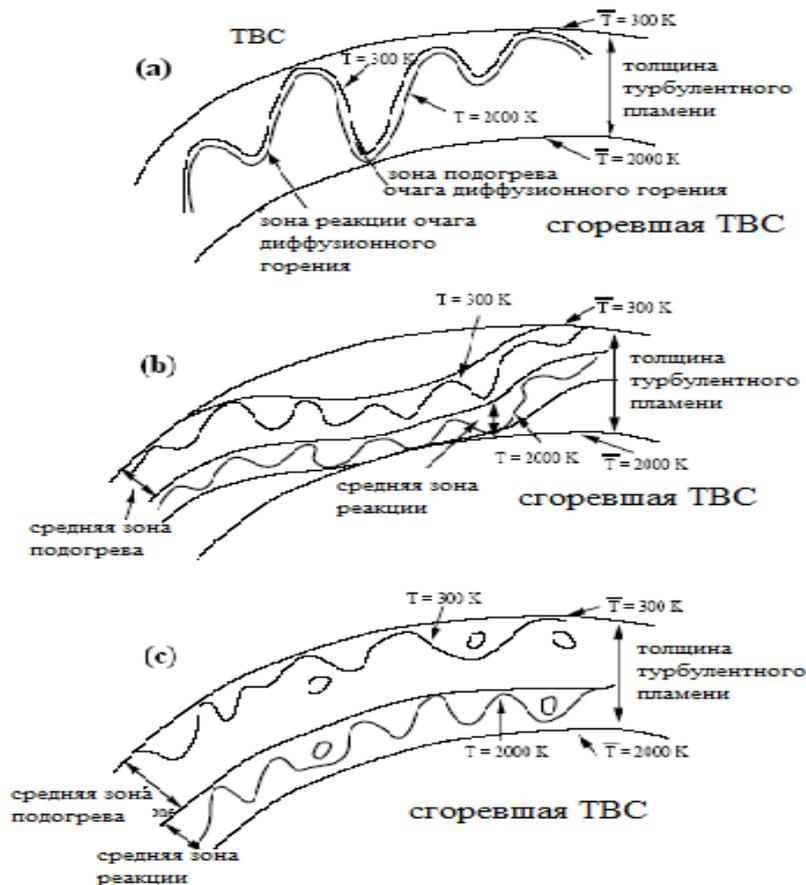


Рисунок 1.8 - Три вида структуры зоны турбулентного горения, предложенные Р. Борги и В. Дестрио

На рисунке 1.8а представлено тонкое искривленное пламя, для которого - Критерий Дамкёллера много больше единицы:

$$Da=t_t/t_c \gg 1$$

где t_t – время существования турбулентных молей,

t_c – время протекания химических реакций.

а Критерий Карловитца меньше единицы

$$Ka=t_c/t_k < 1,$$

где t_k -время существования молей масштаба Колмогорова.

На рисунке 1.8b представлено «уплотненное искривленное пламя» с критерием Карловитца в диапазоне:

$$1 < Ka \leq 100,$$

что соответствует «утолщенное» сморщенное пламя или тонкая реакционная зона реакций горения.

На рисунке 1.8с представлено «плотное» пламя - $Ka > 100$ в котором зона подогрева и зона химических реакций под воздействием турбулентных пульсаций существенно перемешаны.

При увеличении интенсивности турбулентности сначала скорость распространения фронта пламени растет, а затем в связи со значительной деформацией фронта пламени и увеличением степени теплоотвода, происходит снижение температуры что ведет к замедлению процесса сгорания и последующему угасанию, как это показано на рисунке 1.9, где интенсивность турбулентности в потоке в замкнутом сосуде создавали при помощи изменения частоты вращения вентилятора и осуществляли сжигание пропановоздушной смеси

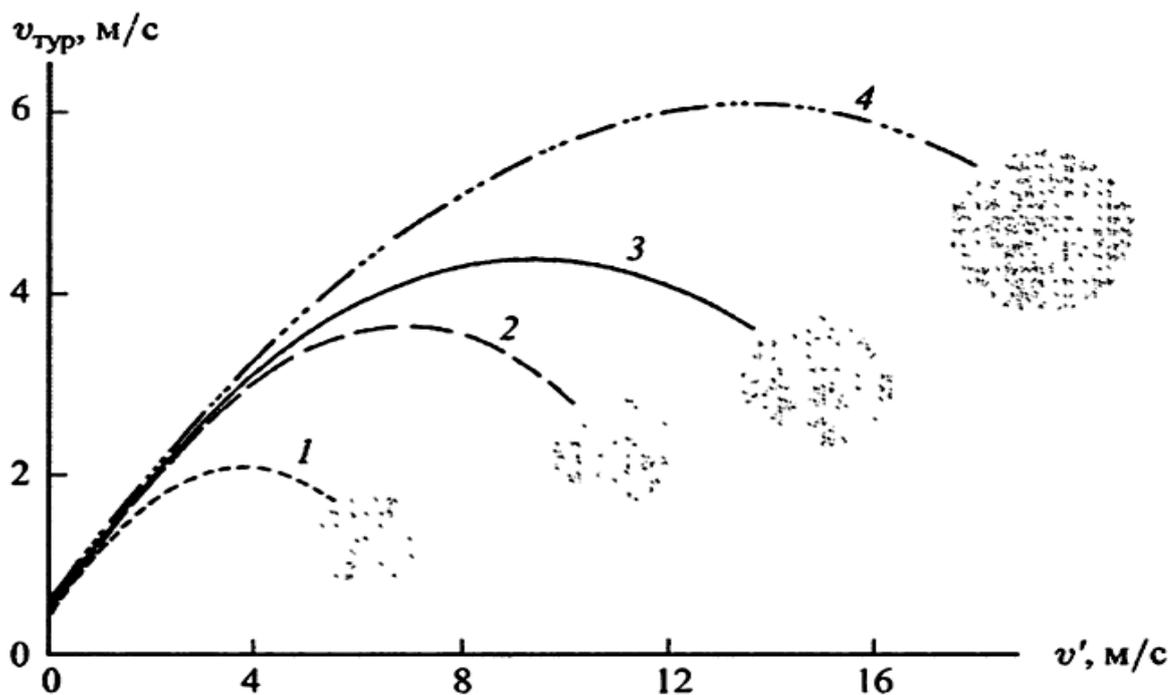


Рисунок 1.9 – Зависимость скорости распространения пламени от интенсивности турбулентности при горении пропановоздушной смеси:

1 – $\alpha = 0,7$; 2 – $0,8$; 3 – $0,9$; 4 – $1,1$; затемненные области: режимы погасания пламени

1.2.4 Влияние конструкции камер сгорания на характеристики течения и турбулентности ТВС в двигателе

В работе [60-62] проведен анализ влияния конструкции камер сгорания на характеристики течения и турбулентности ТВС в двигателе. Для анализа взяты несколько камер сгорания (рисунок 1.10) с принципиально различными механизмами образования турбулентности при сжатии, а именно: плоской, цилиндрической, квадратной, крестообразной, «небула», полусферической, турбинной – все со степенью сжатия 12; конусообразной со степенью сжатия 14 и квадратной и полусферической со степенью сжатия 16.

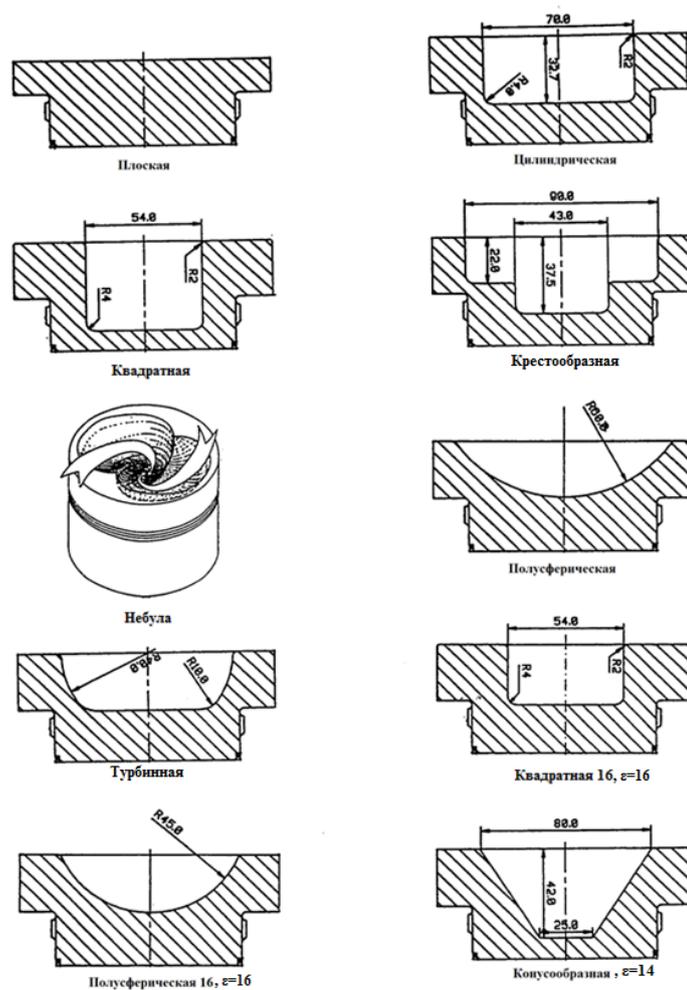


Рисунок 1.10 - Анализ влияния конструкции камер сгорания на характеристики течения и турбулентности ТВС в двигателе

Зона определения скоростей движения и турбулентных пульсаций соответствовала плоскости, перпендикулярной оси цилиндра.

Полученные результаты анализа влияния формы камеры сгорания на параметры турбулентности потока и скорости тепловыделения представлены на рисунке 1.11.

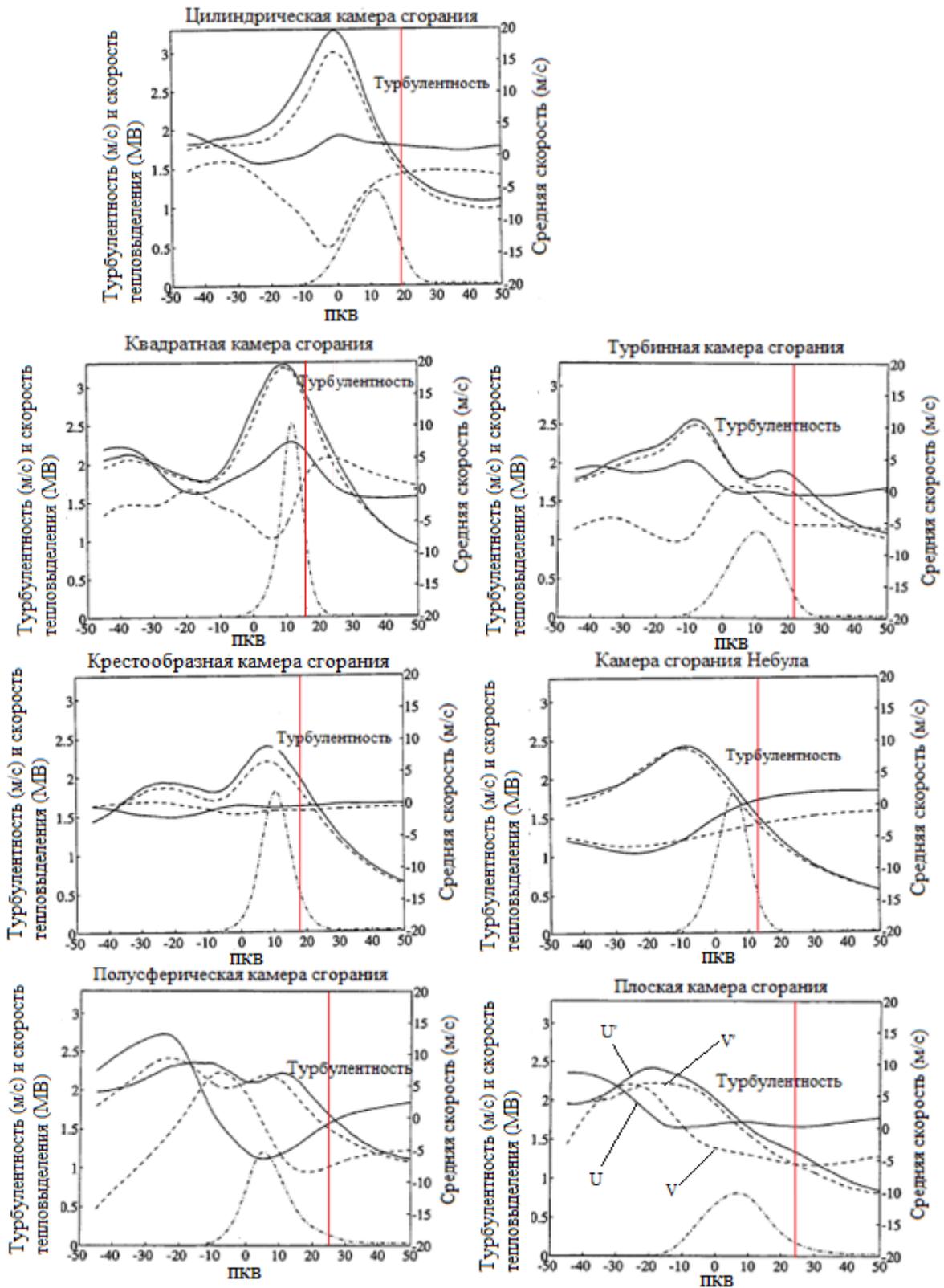


Рисунок 1.11 - Средняя скорость, турбулентность и скорость тепловыделения в интервале угла поворота коленчатого вала от -50 до +50 градусов относительно верхней мертвой точки (ВМТ) при степени сжатия 12

Анализ представленных результатов исследования показал значительное влияние характеристик турбулентности и параметров её вызывающих, за счет изменения формы камеры сгорания на скорость тепловыделения и, следовательно, скорость распространения фронта пламени.

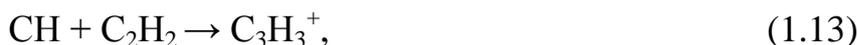
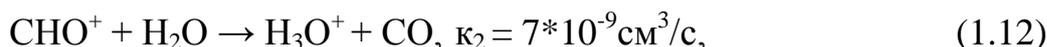
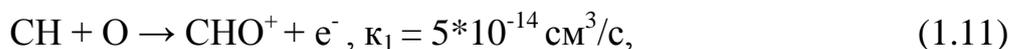
1.2.5 Влияние объема завершения сгорания на скорость распространения пламени

Объем завершения сгорания характеризуется многими параметрами, а именно углом опережения зажигания, частотой вращения, термодинамическими и физико-химическими параметрами смеси и условий сжатия, формой камеры сгорания и другими факторами. В свою очередь объем завершения сгорания характеризует термодинамическое состояние системы через уравнение состояния. Поэтому при большем объеме завершения сгорания температура и следовательно давление в процессе догорания, согласно уравнению состояния, становятся меньше, что способствует снижению интенсивности протекания химических реакций окисления и, следовательно, снижением скорости распространения пламени, тем самым позволяя быстрее угасать пламени и способствовать образованию повышенной концентрации несгоревших углеводородов в пристеночной области замороженного слоя.

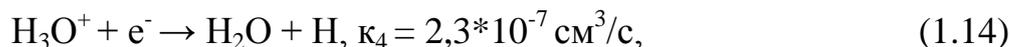
1.3 Хемионизация в углеводородном пламени

Хемионизация в зоне горения углеводородного топлива определена на основе результатов фундаментальных исследований, представленных в [68 – 72]. В соответствии с результатами этих исследований обнаружены в зоне горения следующие ионы: CH_3^+ , CHO^+ , C_3H_3^+ и H_3O^+ . Концентрация иона CH_3^+ составляет меньше одной тысячной концентрации ионов CHO^+ и C_3H_3^+ .

Ион H_3O^+ при протекании химических реакций горения образуется позже остальных. Из этого авторы делают вывод, что первичными ионами, определяющими образование остальных ионов являются ионы CHO^+ и C_3H_3^+ . Ионизация в зоне горения определяется следующими реакциями:



Доминирующим ионом в этой группе является H_3O^+ . Скорость реакции (1.12) значительно выше скорости реакции (1.13), причем почти все ионы CHO^+ трансформируются в H_3O^+ . При взаимодействии этого иона с электроном получается молекула воды и атом водорода:



Реакция (1.14) протекает очень быстро, но столкновение этих 2-х частиц очень мала.

Скорости реакций $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_4$ представлены в [30].

Ионизационные датчики (зонды)

В большинстве экспериментов используются одноэлектродные ионизационные датчики, в которых одним из электродов является изолированный от элементов конструкции двигателя металлический стержень или пластина (для поршневых двигателей – положительный электрод), вторым, отрицательным электродом является корпус двигателя. Подобная схема позволяет в качестве ионизационного датчика использовать свечу зажигания.

Известно, что величина ионного тока в пламени углеводородного топлива определяется напряженностью электрического поля, подвижностью ионов и электронов, а также площадью поверхности электродов датчиков.

В [23] исследовано влияние площади поверхности положительного электрода ионизационного датчика (центральный электрод свечи зажигания) на величину ионного тока.

На рисунке 1.12 для примера представлена осциллограмма записи типичного сигнала ионного тока и индикаторного давления при условиях полной нагрузки двигателя с искровым зажиганием по углу поворота коленчатого вала.

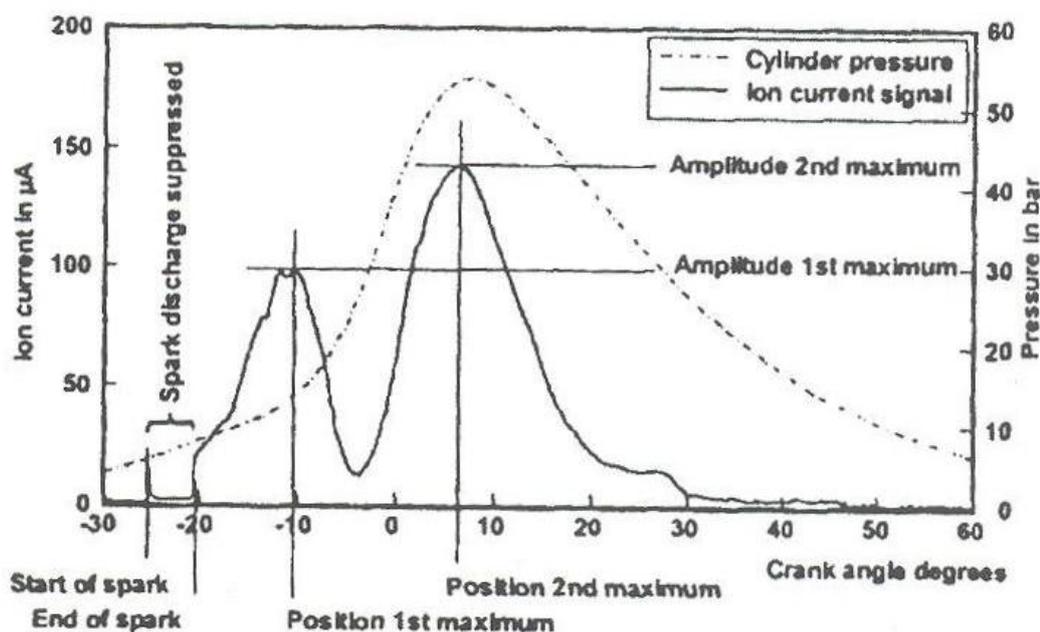


Рисунок 1.12 – Осциллограмма записи типичного ионного тока и индикаторного давления при условиях полной нагрузки двигателя с искровым зажиганием по углу поворота коленчатого вала

Первый пик ионного тока обусловлен явлением химионизации в соответствии с уравнениями (1.12 – 1.14), то есть определяется интенсивностью протекания химических реакций в зоне горения. Второй пик определяется явлением термоионизации. Его положение определяется максимальной величиной индикаторного давления и, следовательно, максимальной температурой продуктов сгорания. Считается, что ток термоионизации определяется в основном образованием ионов NO^+ и соответствующих этим ионам электронов.

Площадь поверхности изменялась за счет установки на центральный электрод специально изготовленных дисков, как это показано на рисунке 1.13.

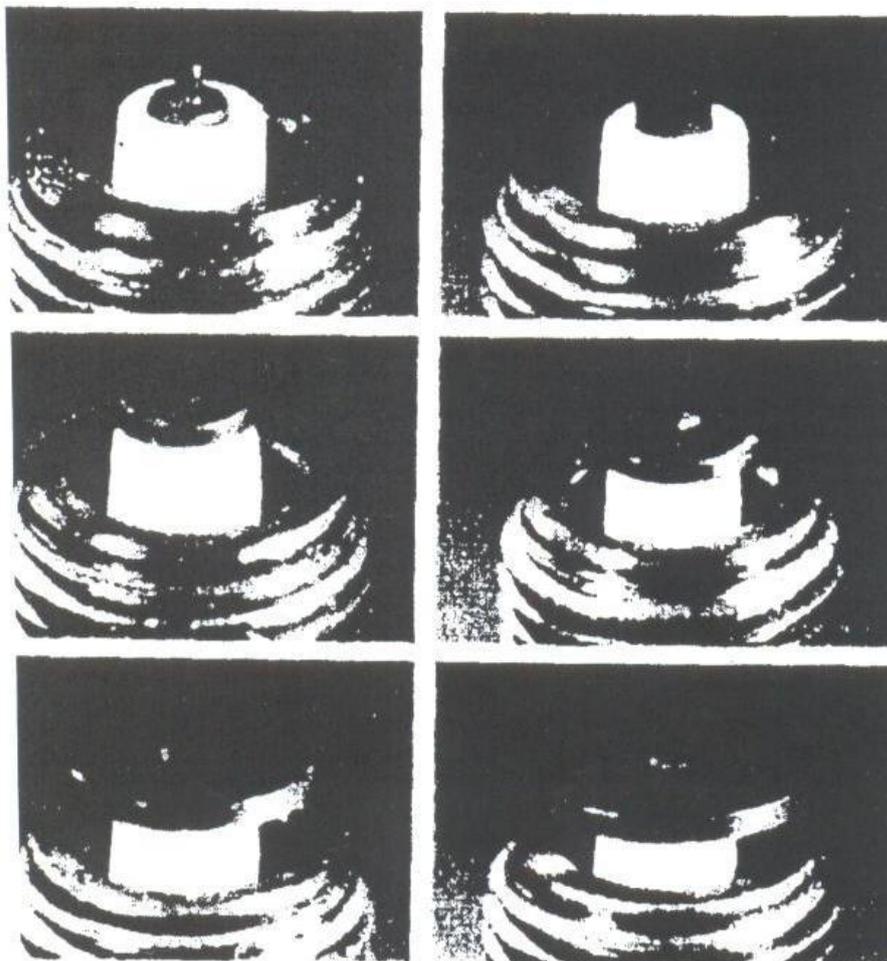


Рисунок 1.13 – Площадь поверхности изменялась за счет установки на центральный электрод специально изготовленных дисков

Диаметр дисков изменялся от 1 мм до 11 мм с шагом 2 мм. Площадь поверхности для этих диаметров представлена в таблице 1.2

Таблица 1.1 - Площадь поверхности центрального электрода

Диаметр, мм	1	3	5	7	9	11
Площадь, мм ²	12	26	56	92	148	218

Зависимость величины ионного тока и характер его протекания от площади поверхности электрода представлена на рисунке 1.14.

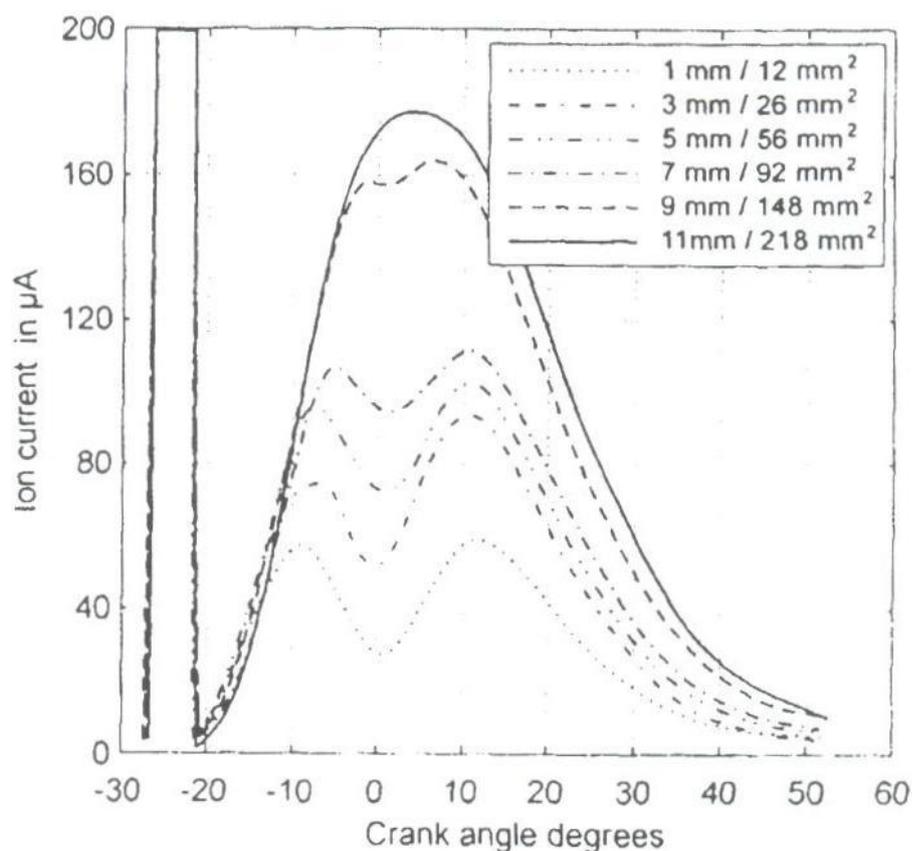


Рисунок 1.14 – Зависимость величины ионного тока и характер его протекания от площади поверхности электрода

До площади поверхности электрода, соответствующей 92 мм² (диаметр диска 7 мм) можно выделить два пика ионного тока, первый – ток химионизации, второй – ток термоионизации. При площадях поверхности 148 и 218 мм² регистрируется один пик ионного тока, положение которого находится между пиками химионизации и термоионизации, что свидетельствует о сложении величин этих ионных токов.

Большой площади поверхности электродов соответствует большая величина ионного тока. Причем до площади электрода 148 мм² зависимость между величиной ионного тока и площадью положительного электрода является практически линейной.

Авторы делают вывод о том, что вполне приемлемым для исследования процессов сгорания в области установки свечи зажигания является применение положительного электрода диаметром 3мм, размеры которого близки к размерам центрального электрода промышленных свечей зажигания.

Анализ стехиометрического соотношения топлива и воздуха в камере сгорания

Существующие датчики определения состава смеси измеряют коэффициент избытка воздуха осредненный по всем цилиндрам. В то же время состав смеси по отдельным цилиндрам не является идентичным, что ведет к увеличению токсичности ОГ, снижению эффективности работы двигателя и неравномерности крутящего момента. В связи с этим предложено определять коэффициент избытка воздуха в каждом цилиндре отдельно по характеристикам распространения пламени, которые можно определять с высокой точностью и быстродействием. Этим условиям отвечают системы измерений, основанные на использовании явления электропроводности. Ионный ток в зоне горения углеводородного топлива, величина и его изменение, регистрируется мгновенно, так как определяются подвижностью электронов, возникающих при ионизации пламени. Следовательно, подобная система способна непрерывно и безинерционно регистрировать интенсивность протекания химических реакций горения при распространения пламени.

Концентрации ионов с учетом состава смеси могут быть определены следующим образом:

$$[\text{CHO}^+] = (\kappa_1[\text{CH}][\text{O}]) / (\kappa_2[\text{H}_2\text{O}]) \quad (1.16)$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{макс}} = (\kappa_2[\text{CHO}^+][\text{H}_2\text{O}]) / (\kappa_4 e^-) = (\kappa_1[\text{CH}][\text{O}]) / (\kappa_4 e^-) \quad (1.17)$$

Так как в зоне реакций $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{макс}} \approx e^-$, то уравнение (1.17) можно переписать в виде

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{макс}} = (\kappa_1[\text{CH}][\text{O}]/\kappa^4)^{0,5} \quad (1.18)$$

В квадратных скобках указаны концентрации соответствующих элементов. Уравнение (1.18) показывает, что концентрация ионов будет уменьшаться с обеднением топливно-воздушной смеси (ТВС) относительно стехиометрии. При обогащении ТВС относительно стехиометрического состава происходит уменьшение концентрации кислорода и, в связи с этим медленный рост концентрации СН. При этом возрастает и концентрация H_3O^+ , максимум которой приблизительно соответствует коэффициенту избытка воздуха $\alpha \approx 0,8 - 0,9$. Затем при дальнейшем обогащении эта концентрация снижается. Тогда при $\alpha > 0,8$ можно использовать следующее выражение

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{макс}} = \text{const}/\alpha^{0,5} \quad (1.19)$$

Эксперименты проводились на 4-х цилиндровом двигателе фирмы Опель с 16-ю клапанами, объемом 1,6 л, степенью сжатия 10,5. Максимальный крутящий момент составлял 150 Нм при 3800об/мин и мощностью 80 кВт при 6000 об/мин.

Наиболее простым решением при разработке системы исследования характеристик изменения ионного тока от состава смеси в двигателях с искровым зажиганием является использование в качестве одноэлектродного ионизационного датчика свечи зажигания [10 – 12]. В этом случае центральный электрод свечи зажигания используется в качестве положительного электрода, а боковой электрод, соединенный резьбовым соединением с корпусом ДВС – отрицательного электрода.

Две серии экспериментов проведены в диапазоне частот вращения коленчатого вала 1300-4000 об/мин, крутящего момента 19-85 Нм, коэффициент избытка воздуха, α (λ), 0,9-1,1.

В первой серии (рисунок 1.15) момент зажигания поддерживался постоянным, менялся коэффициент избытка воздуха, во второй (рисунок 1.15) – угол поворота коленчатого вала, при котором достигалось максимальное давление цикла, поддерживался в диапазоне 12 - 15 градусов после верхней мертвой точки (ВМТ) при изменении коэффициента избытка воздуха.

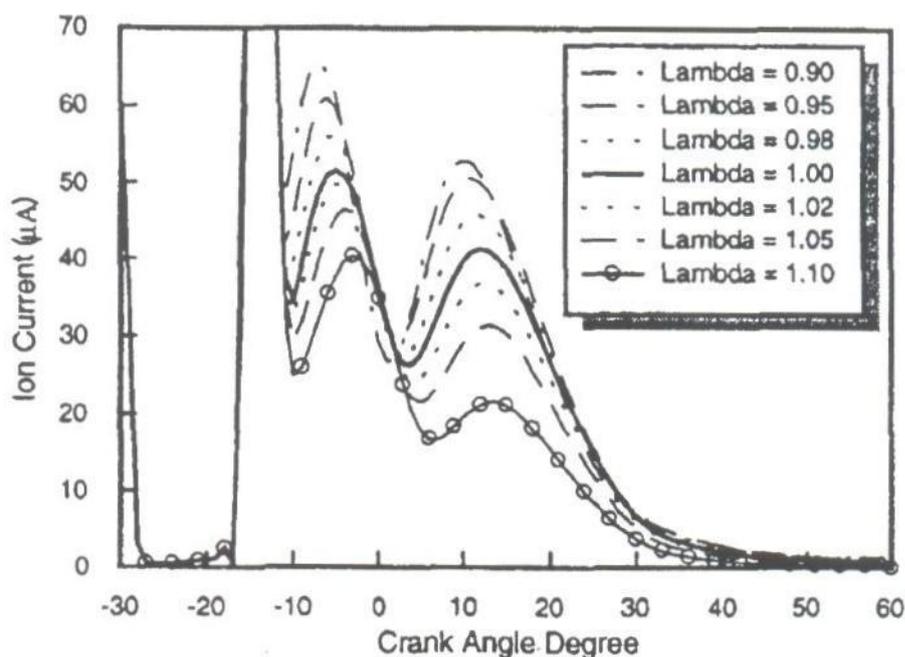


Рисунок 1.15 – Типичные осциллограммы измерения ионного тока, осредненной по 500 циклам, при 2500 об/мин и средней нагрузке при изменении коэффициента избытка воздуха, α (λ) от 0,9 до 1,1

На рисунке 1.15 представлен пример осциллограммы измерения ионного тока, осредненной по 500 циклам, при 2500 об/мин и средней нагрузке при изменении коэффициента избытка воздуха, α (λ) от 0,9 до 1,1.

Как и в предыдущем разделе 1-ый пик соответствует ионному току химионизации, 2-ой – термоионизации. Уменьшение коэффициента избытка воздуха от 1,1 до 0,90 сопровождается практически монотонным ростом амплитуды ионного тока химионизации и смещением пика в область меньших углов поворота коленчатого вала. Для пика термоионизации зависимость ионного тока от состава смеси более сложная.

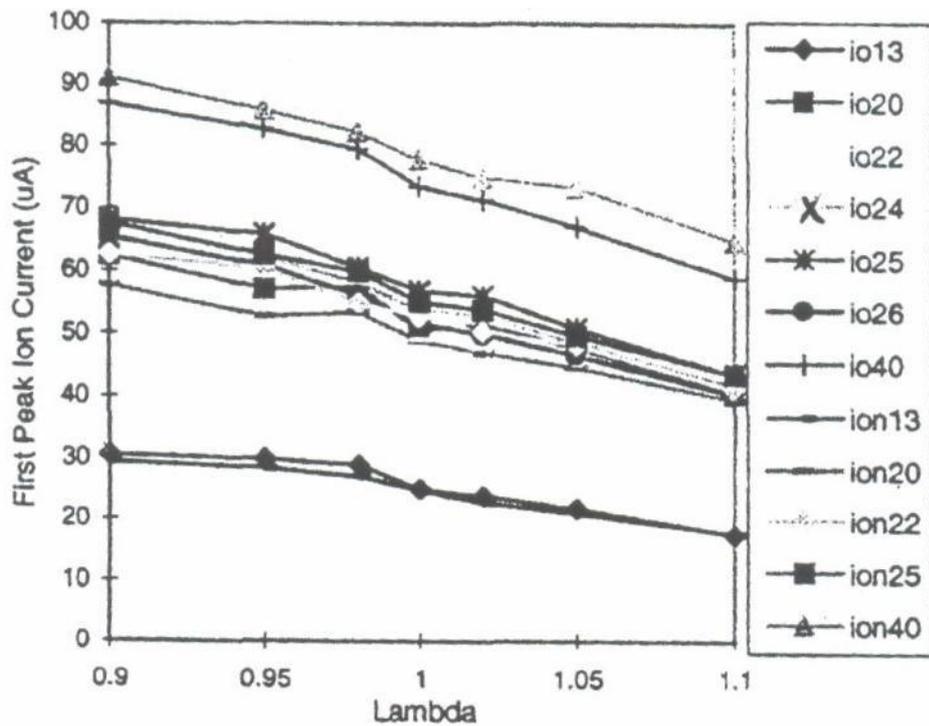


Рисунок 1.16 - Зависимости ионного тока от состава смеси для различных скоростных режимов работы двигателя

На рисунке 1.16 представлены зависимости ионного тока от состава смеси для различных скоростных режимов работы двигателя (от 1300 об/мин до 4000 об/мин).

Для всех скоростных режимов работы двигателя получены линейные зависимости амплитуды ионного тока от состава смеси – с увеличением коэффициента избытка воздуха происходит уменьшение величины амплитуды ионного тока. Увеличение скоростного режима приводит к существенному росту ионного тока. Так при $\alpha = 0,9$ увеличение оборотов двигателя с 1300 до 2500 вызвало рост ионного тока вдвое, а от 2500 до 4000 в полтора раза. Для $\alpha = 1,1$ получены такие же соотношения. Следует отметить некоторое расслоение зависимостей ионного тока, полученное при различных условиях проведения эксперимента. Так в первой серии время длительность зажигания поддерживалась постоянной, менялся коэффициент избытка воздуха, во второй – угол поворота коленчатого вала, при котором достигалось максимальное давление цикла, поддерживался в диапазоне 12-15

градусов после верхней мертвой точки (ВМТ) при изменении коэффициента избытка воздуха.

Для устранения указанного расслоения зависимостей экспериментальные данные обработаны с учетом значения угла поворота коленчатого вала, соответствующего положению пика ионного тока. На рисунке 1.17 представлены зависимости отношения величины пика ионного тока к значению угла поворота коленчатого вала, при котором этот пик достигнут от состава смеси.

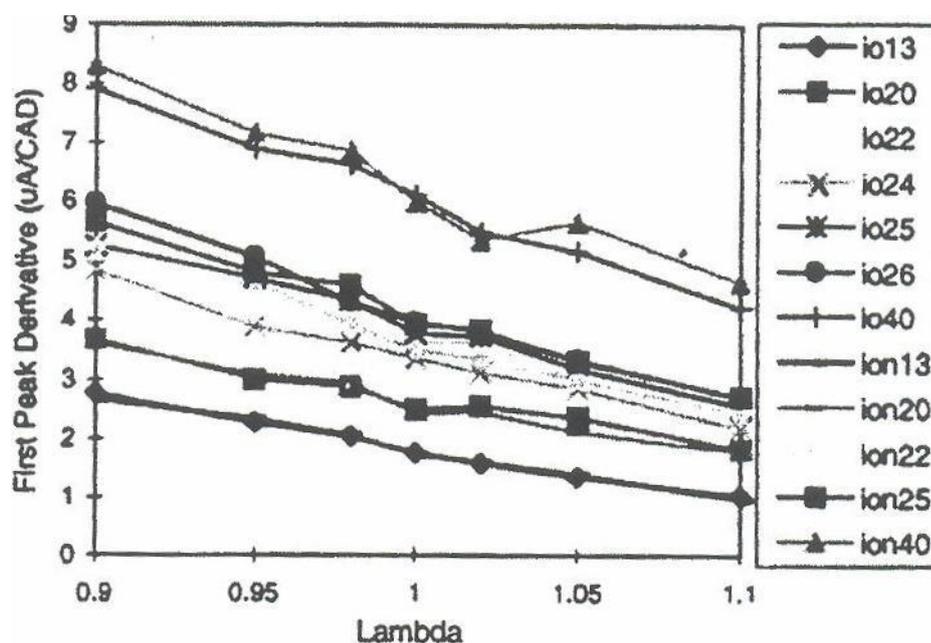


Рисунок 1.17 – Зависимости отношения величины пика ионного тока к значению угла поворота коленчатого вала, при котором этот пик достигнут от состава смеси

В предложенных координатах расслоение рассматриваемых зависимостей отсутствует. Анализ экспериментальных данных и их обработка в виде зависимостей, представленных на рисунке 1.3.8, позволил авторам получить зависимость коэффициента избытка воздуха, α (λ), от амплитуды ионного тока и соответствующего ей угла поворота коленчатого вала в виде:

$$\alpha(\lambda) = (24,45 - dI/d\theta)/18,17, \quad (1.20)$$

где I – ионный ток, μA ,

θ – угол поворота коленчатого вала, градусы.

На рисунке 1.18 представлено сравнение расчетных значений амплитуды ионного тока с полученными экспериментально по углу поворота коленчатого вала. Расчет проводился с привлечением формул (1.12 – 1.19), учетом напряженности электрического поля и размерами зоны горения.

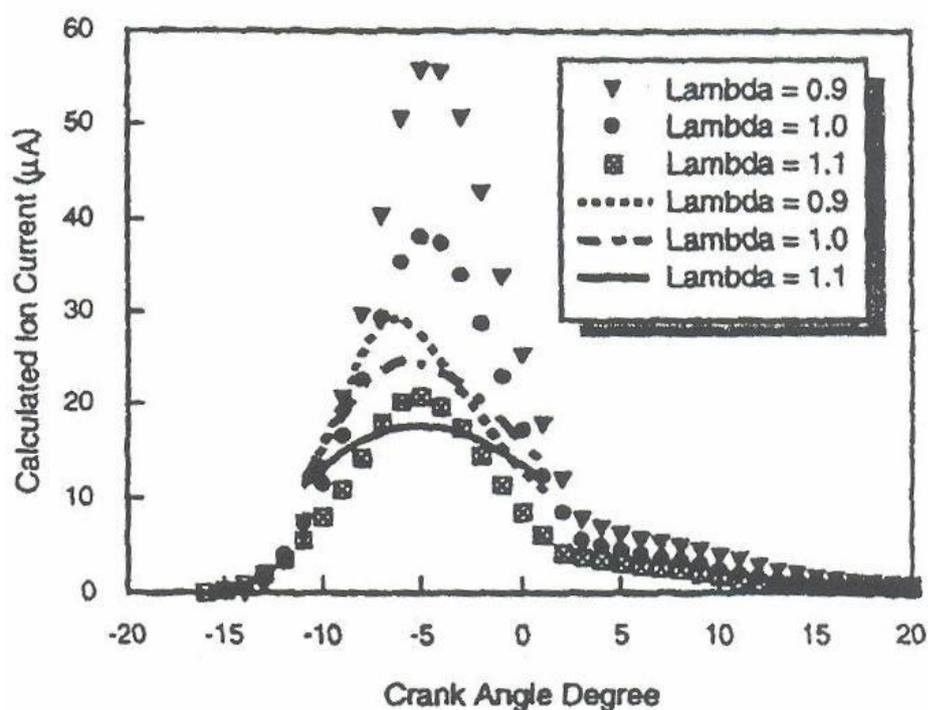


Рисунок 1.18 - Сравнение расчетных значений амплитуды ионного тока с полученными экспериментально по углу поворота коленчатого вала

Для коэффициента избытка воздуха, равного 1,1, получено неплохое совпадение. Для $\alpha(\lambda) = 1,0$ и 1,1 имеется большое количественное расхождение.

По мнению авторов необходимо дальнейшее развитие исследований в данном направлении.

1.4 Экспериментальные зависимости ионного тока от состава смеси, вида топлива, добавки промотора горения водорода

Применение водорода для повышения скорости распространения фронта пламени, применяется достаточно давно [5-15]. На рисунке 1.19 представлена экспериментальная оценка взаимосвязи величины изменения напряжения при различных составах ТВС с добавкой водорода проведенная на УИТ-85 на кафедре тепловые двигатели.

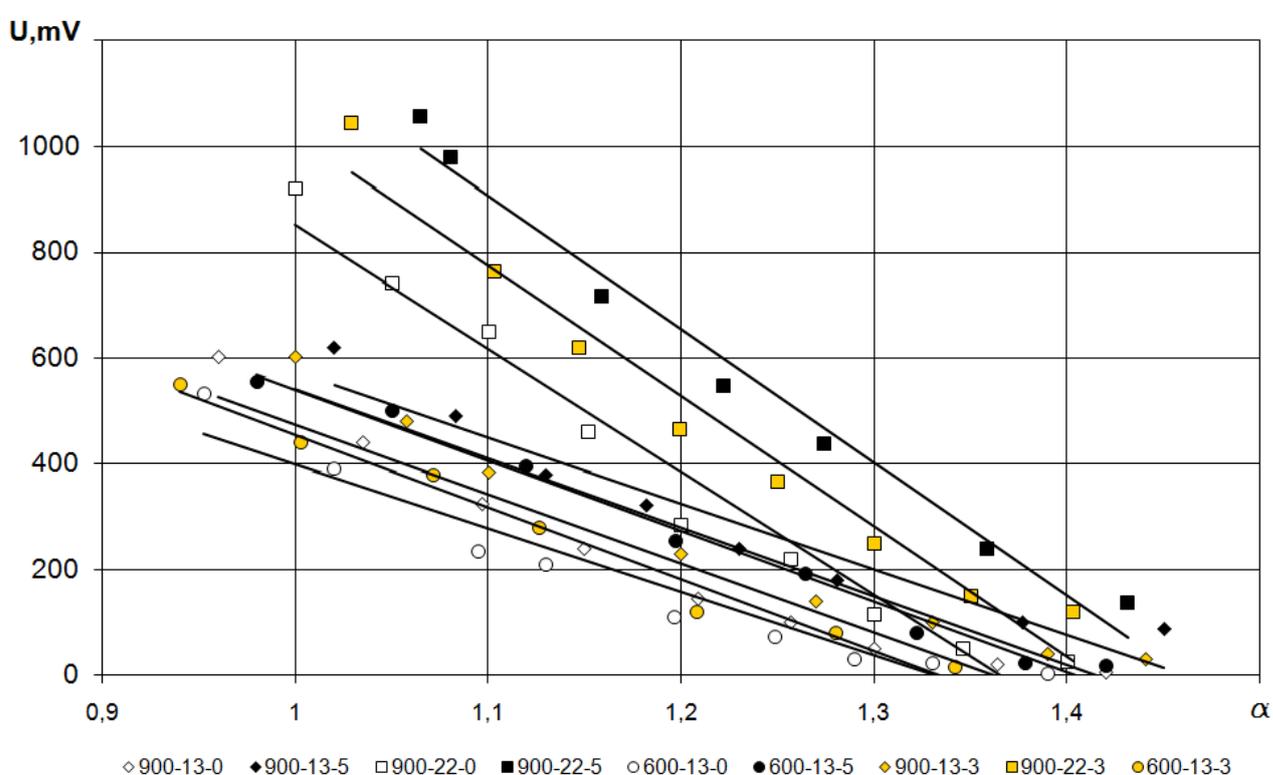


Рисунок 1.19 - Экспериментальная оценка взаимосвязи величины изменения напряжения при различных составах ТВС с добавкой водорода

Анализ результатов, приведенных на рисунке 1.19, говорит о повышении интенсивности реакций горения во фронте пламени при добавлении водорода в бензовоздушную смесь. Показано что увеличение скорости распространения фронта пламени и интенсивности процесса сгорания происходят в больших долях по сравнению с долей добавляемого в топливо водорода. Таким образом получено что водород не только ускоряет

процесс сгорания за счет своих более быстрых параметров сгорания, но и еще значительно интенсифицирует его, т.е. происходит так называемое промотирование процесса сгорания.

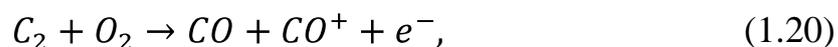
1.5 Ионизация в пламени углеводородного топлива

За последнее время появилось много работ по исследованию ионизации в зоне горения углеводородного топлива.

Наиболее полно к настоящему времени результаты исследований по ионизации пламени рассмотрены в монографии Е.М. Степанова и Б.З. Дьячкова [75].

Для создания простых и в то же время надежных ионизационных сигнализаторов горения необходимо знать основные вопросы ионообразования в пламени.

Рассмотрим некоторые экспериментальные работы по ионизации диффузионного пламени газовых смесей. В опытах Кинбары и др. [76] диффузионное плоское пламя пропана и водорода у основания горелки отчетливо делится на три слоя. У устья горелки располагается зеленая зона, затем голубая и фиолетовая. Зеленая окраска первого слоя обусловлена излучением радикала C_2 , голубая вызвана присутствием радикала CH . Размеры слоев составляли, соответственно, 0,5; 1,0 и немногим более 1,0 мм. Максимум концентрации ионов приходился на голубую зону. Авторы [76] полагают, что ионообразование происходит или в нижнем зеленом слое, или непосредственно вблизи его. Процесс ионизации они связывают с присутствием радикала C_2 и считают возможной следующую схему



Существует многочисленная группа исследователей [77-79, 80-81] которые считают одной из основных причин образования заряженных

частиц в углеводородном пламени термоэмиссию электронов с раскаленных частиц углерода.

Равновесная концентрация электронов в этом случае является функцией температуры, размеров, концентрации частиц углерода и начальной работы выхода электрона.

$$Ne^* = Ne \cdot \frac{-e \cdot m_0}{r \cdot k \cdot T}, \quad (1.21)$$

В работах [77, 80-82] равновесная концентрация свободных электронов при термоэмиссии с учетом рекомбинации электронов на поверхности частиц выражается равенством:

$$Ne = \frac{r \cdot 2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot k \cdot T^{3/2}}{h^3} \cdot \exp \frac{-\varphi}{k \cdot T}, \quad (1.22)$$

Таким образом концентрация свободных электронов в пламени определяется температурой частиц и работой выхода электрона.

Экспериментальные данные Мшишкена [8] показали практическое совпадение температур газа и частиц в пламени. Работа выхода электрона является функцией размеров частиц и их химического состава. Абсолютные значения работы выхода для частиц сажи, приводимые различными авторами, значительно расходятся. Твердохлебов [19], Аршинов и Мусин [77] принимают $\varphi = 4,35$ эВ. Шулер и Вебер [21] оценивают работу выхода в 8,5 эВ. Очевидно, значение $\varphi = 4,35$ эВ слишком занижено, так как химический состав и структура частиц сажи и графита весьма различны. Работа выхода твердого углерода составляет 3,8, работа выхода радикала $C_2 = 12$ эВ. По расчетам Калькотта [23] присутствие в факеле частиц с потенциалом ионизации около 5 эВ могло бы объяснить причину повышенной ионизации. Богатые углеводородные пламена содержат частицы сажи в широком диапазоне размеров. Следовательно можно

предполагать, что поведение небольших образований углерода будет промежуточным между поведением твердого углерода и радикала C_2 .

Зингер и Груммер [84] исследовали плоские и канонические пламена очень богатых пропановоздушных и этиленовоздушных смесей. В пламени отчетливо выделялись зоны определенной окраски. Горение начиналось в тонкой голубой зоне над устьем горелки. На расстоянии 3 мм от голубой зоны по потоку находилась желтая зона. Протяженность ее достигала 15 см. Между голубой и желтой зонами существовала тонкая переходная область. В начале желтой зоны находилась узкая зеленая зона размером 1 мм.

Эксперименты показали наличие максимума ионизации в желтой части пламени.

Температура пламени в желтой зоне ниже, чем в предшествующей голубой. Из этого авторы делают вывод, что ионизация обусловлена накоплением частиц, которыми, вероятно, являются ядра углерода или углеродосодержащие вещества с низким потенциалом ионизации.

На основании работ по термоэмиссии электронов с раскаленных углеродных частиц можно сделать вывод, что термоэмиссия - одна из причин образования заряженных частиц в углеводородном пламени причем данный механизм не связан с зоной реакций горения. Механизм термоэмиссии электронов должен работать в течение времени, пока температура частиц достаточно высока.

1.6 Заключение по 1-ой главе

Обзор литературных данных показывает следующее:

- 1 Появление и изменение ионного тока в электрической цепи ионизационных датчиков, обусловленное явлением хемиионизции, отражает начало появления контакта пламени углеводородного топлива с контактами датчика и интенсивность протекания химических реакций горения в зоне установки электродов датчика.

2 По появлению и исчезновению ионного тока можно определять видимые скорости распространения пламени и его размеры в исследуемых зонах камеры сгорания.

Рассмотренные заключения позволили сформулировать следующие задачи исследования:

1. Выявить на основе экспериментальных данных взаимосвязь основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.
2. Определить возможности повышения эффективности и стабильности процесса сгорания на основе взаимосвязи основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.

Глава 2 Экспериментальное оборудование и методика проведения и обработки результатов испытаний

2.1 Описание основной экспериментальной установки

Изучение основных характеристик процесса сгорания, а именно появление, исчезновение и изменение ионных токов химионизации, а также видимых скоростей распространения фронта пламени использовался экспериментальный стенд, основной частью которого являлась специальная установка УИТ-85 [15] (рисунок 2.1). УИТ-85 позволяет исследовать характеристики сгорания топливно-воздушной смеси в условиях ДВС с внешним смесеобразованием. Причём при изменении одного из параметров работы остальные параметры установки поддерживаются с высокой степенью точностью постоянными, что позволяет минимизировать неоднородность состава смеси от цикла к циклу и, тем самым, снизить межцикловую нестабильность (МЦН) работы двигателя.

В выбранных зонах камеры сгорания переменного объёма в зависимости от задач проведения экспериментов устанавливались ионизационные датчики различной конструкции, датчики давления, датчики определения угла поворота коленчатого вала, а также отметчики времени.

Схема экспериментальной установки на базе УИТ-85 показана на рисунке 2.2.

Конструкция экспериментальной установки предусматривает изменять степень сжатия (ϵ) от 4 до 10 бесступенчато.

Система измерения расхода топлива содержит расходную ёмкость, которая прокачивается ручной помпой при заполнении топливом с удалением воздуха. Массовый расход топлива определялся измерением уменьшения массы расходной емкости с топливом, помещенной на весах.

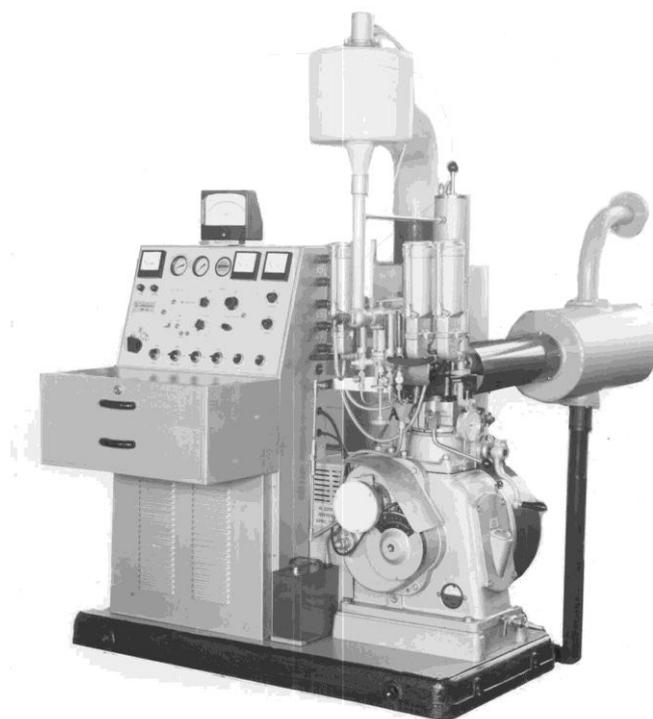


Рисунок 2.1 –Экспериментальная установки

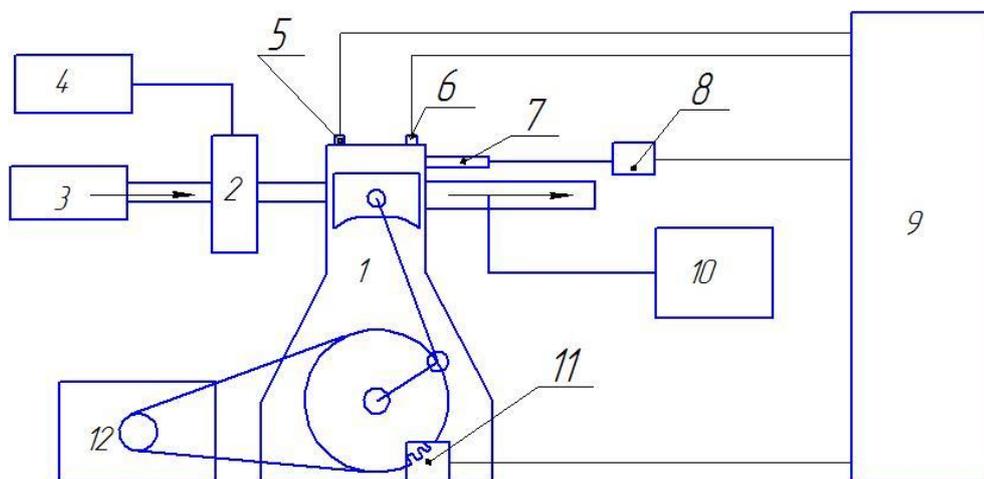


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки

1 - УИТ-85; 2 – карбюратор; 3 - впускной тракт с расходомером воздуха; 4 - система топливоподачи и измерения расхода топлива; 5 - датчик давления; 6 - датчик ионизации; 7 - свеча зажигания; 8 - датчик искрового разряда; 9 - аналогово-цифровой преобразователь и ПК; 10 – газоанализатор; 11 - ДПКВ; 12 - стартер генератор привод УИТ-85

Использовались лабораторные весы VM 512 2-го класса точности. Погрешность измерения составляла 20 мг.

Конструкция экспериментальной установки предусматривает изменять степень сжатия (ϵ) от 4 до 10 бесступенчато.

Система измерения расхода топлива содержит расходную ёмкость, которая прокачивается ручной помпой при заполнении топливом с удалением воздуха. Массовый расход топлива определялся измерением уменьшения массы расходной емкости с топливом, помещенной на весах.

Использовались лабораторные весы VM 512 2-го класса точности. Погрешность измерения составляла 20 мг.

Весы с расходной ёмкостью представлены на рисунок 2.3, пример записи показаний весов – на рисунок 2.4.



Рисунок 2.3 – Весы лабораторные VM 512

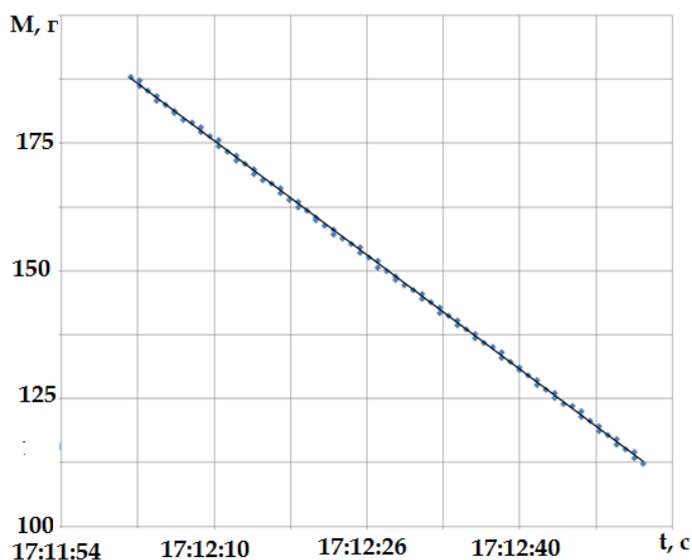


Рисунок 2.4 – Пример записи показаний весов

Структурная схема системы измерения расхода воздуха представлена на рисунке 2.5.

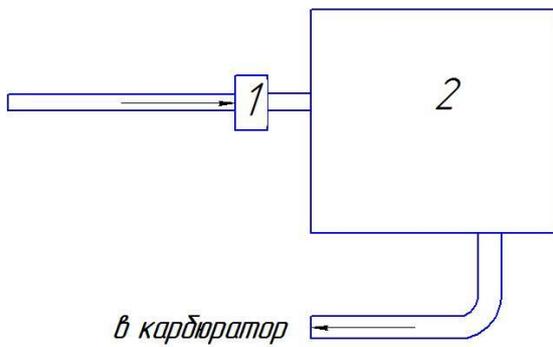


Рисунок 2.5 – Схема системы измерения расхода воздуха:

1- датчик массового расхода воздуха, 2 – ресивер

квадратичной зависимостью.

Ресивер 2 предназначен для снижения пульсаций воздуха, для обеспечения точности измерений. В качестве мерительного инструмента был выбран термоанемометрический датчик расхода воздуха типа BOSCH 0 280 218 037.

Калибровочная кривая показана на рисунке 2.6. Видно, что данная кривая хорошо аппроксимируется

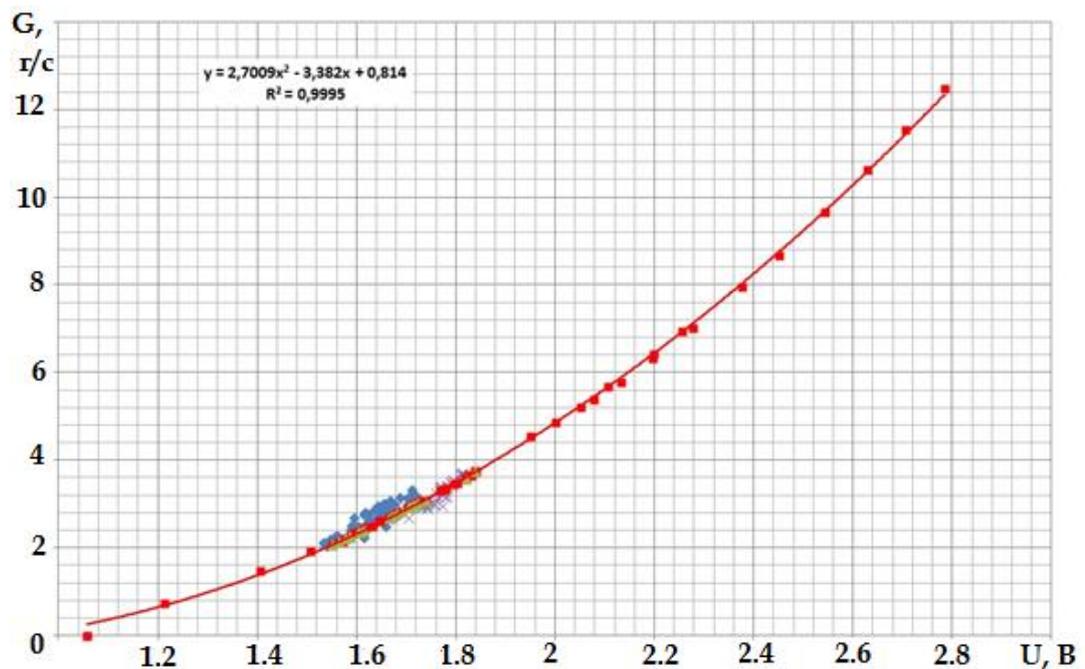


Рисунок 2.6 –Кривая калибровки для определения расхода воздуха

Для определения влияния добавки водорода на характеристики сгорания топлива использовалась специально сконструированная и изготовленная собственными силами система подачи водорода в двигатель. Подача водорода производится из баллона высокого давления через редуктор

и блок из 4-х форсунок во впускной коллектор. В экспериментах перед блоком форсунок поддерживался перепад давления $\Delta P = 0,35$ МПа.

На рисунке 2.7. показана установка ионизационных датчиков в камеру сгорания.

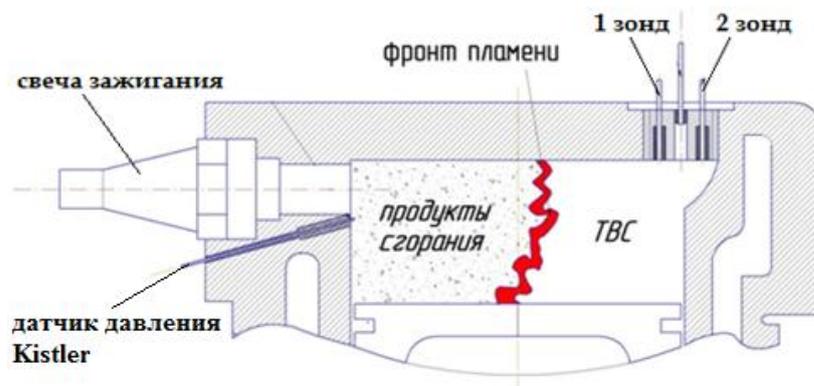


Рисунок 2.7 –Камера сгорания с датчиками ионизации и давления

Корпус ионизационных датчиков с изолированными электродами показан на рисунке 2.8. Электроды датчика ионизации первого и второго зонда расположены на расстоянии 74 и 88 мм от свечи зажигания. Эскиз ионизационного датчика представлен на рисунке 2.9.

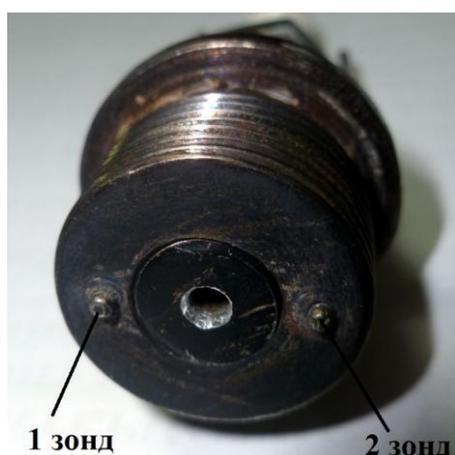


Рисунок 2.8 – Общий корпус датчика с ионизационными зондами

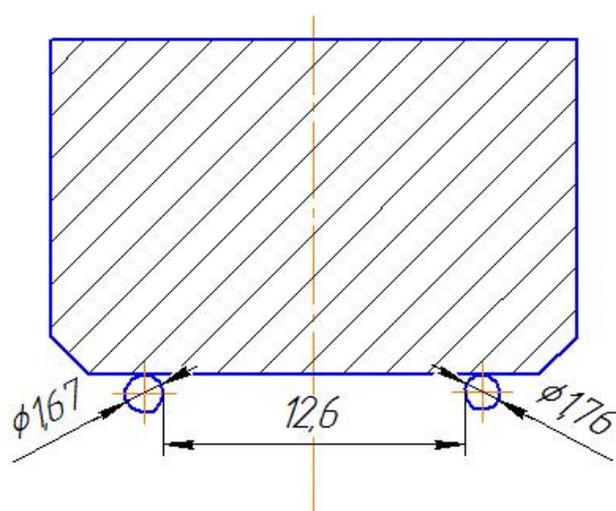


Рисунок 2.9 –Эскиз ионизационного датчика

Принципиальная схема части регистрации ионного тока представлена на рисунке 2.10.

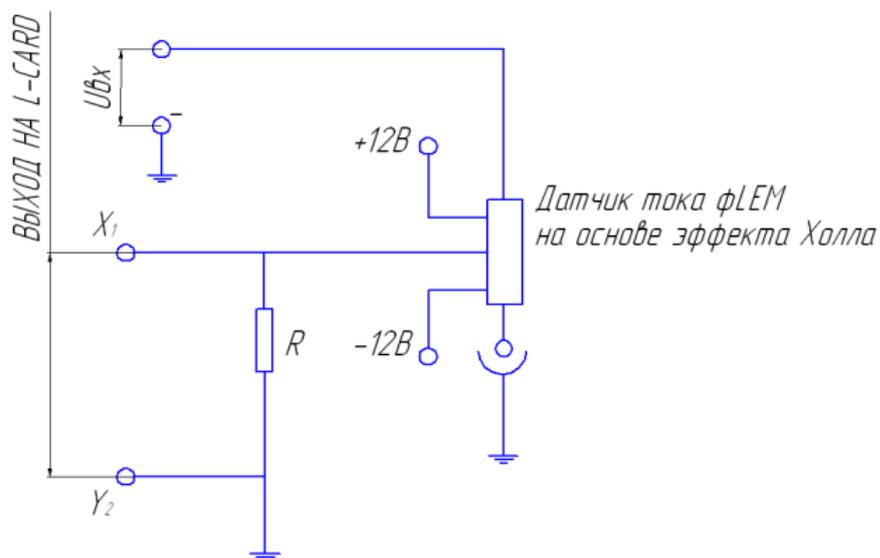


Рисунок 2.10 – Принципиальная схема регистрации сигналов ионного тока

2.2 Методика проведения эксперимента

При проведении экспериментов изменялись следующие параметры: коэффициент избытка воздуха ($0,7 < \alpha < 1,4$), доля добавляемого водорода ($0\% < g_{H_2} < 5\%$ от массы ТВС), угол опережения зажигания ($13 \text{ гр.} < \theta_{o.z.} < 22 \text{ гр.}$) и частота вращения коленчатого вала ($600 \text{ мин}^{-1} < n < 900 \text{ мин}^{-1}$). В экспериментах измерялись следующие параметры: частота вращения коленчатого вала, расходы топлива, воздуха и водорода, угол опережения зажигания, степени сжатия и изменения параметров ионного тока.

Производились замеры параметров, определяющие атмосферные условия (давление, влажность, температура) и рабочие параметры установки (температура охлаждающей жидкости и температура масла в картере).

Обработка величины ионного тока и его изменения производилось по времени от искрового разряда до начала сигнала и по изменению ионного тока (рисунок 2.11).

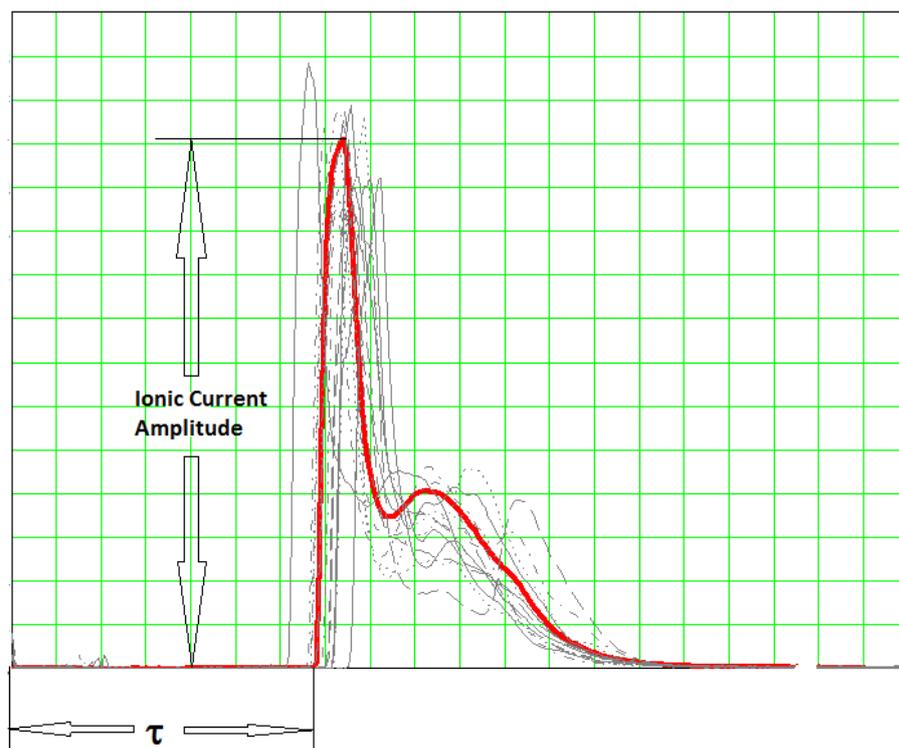


Рисунок 2.11 – Оценка ионного тока

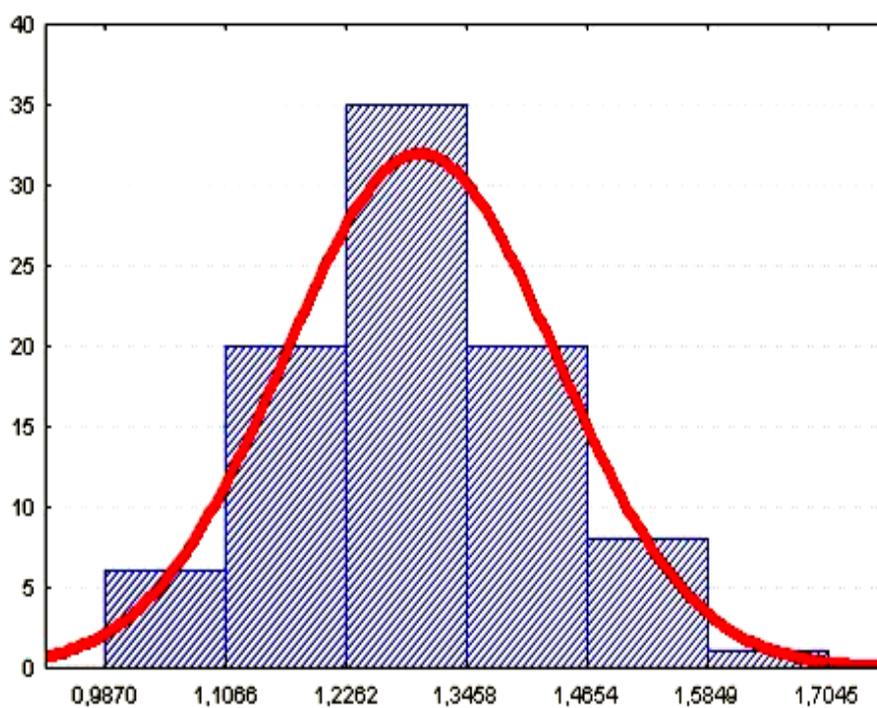


Рисунок 2.12 – Гистограмма распределения ионного тока

При обработке результатов испытаний производилось усреднение не менее 50 циклов. В основном отмечалось нормальное распределение параметров оценки ионного тока (рисунок 2.12).

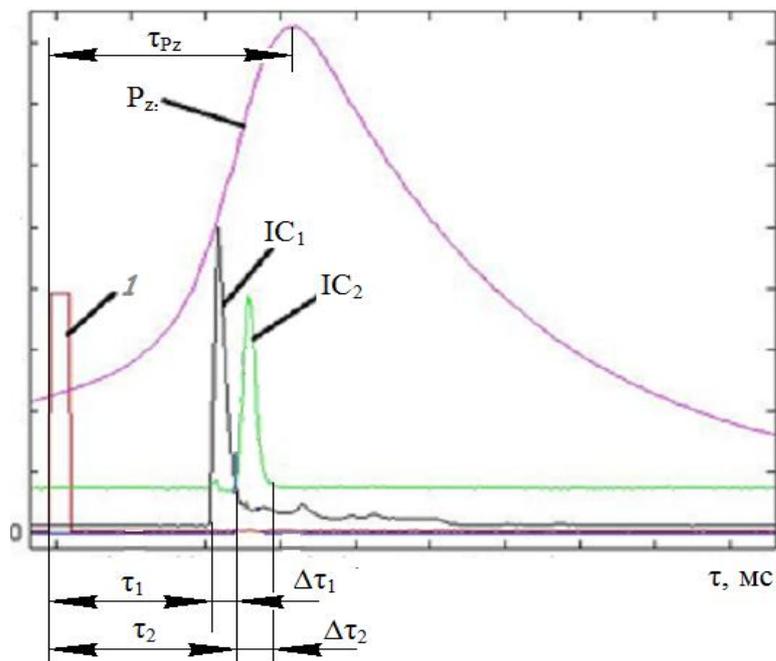


Рисунок 2.13 – Пример регистрации экспериментальных параметров : 1 – датчик искры

Типичная осциллограмма регистрации измеряемых параметров представлена на рисунке 2.13.

Продолжительность существования ионного тока определяется длительностью замыкания электрической цепи – временем омывания пламенем электродов датчика ($\Delta\tau$).

В работе проводилась проверка и оценка погрешности и точности экспериментальных результатов исследования по ГОСТ, в результате были получены следующие результаты.

В итоге максимальные относительные погрешности составят:

- для амплитуды сигнала ионного тока – $\delta_{IC} = \delta_{ICo} + \delta_{ICn} = 18,65\%$,
- для времени начала сигнала – $\delta_{\tau} = \delta_{\tau o} + \delta_{\tau n} = 16,65\%$,

- для времени продолжительности сигнала - $\delta_{\Delta\tau} = \delta_{\Delta\tau o} + \delta_{\Delta\tau m} = 18,39\%$.

2.3 Исследование электропроводности факела пламени при сжигании неоднородной ТВС в прямоточных камерах сгорания

При изучении данного явления одновременно с получением некоторых общих закономерностей ставилась задача создания ионизационных сигнализаторов горения для существующих прямоточных камер сгорания. В связи с этим основная часть исследований была проведена на моделях, в которых фронтными устройствами являлись части фронтного устройства этих прямоточных камер сгорания.

Для удобства сравнения результатов экспериментов, полученных на экспериментальной установке и на изделии, обобщение данных производилось по коэффициенту избытка воздуха $\alpha_{СТ}$, определяемого по формуле

$$\alpha_{СТ} = \frac{\rho_{г} \cdot W_{\infty} \cdot F_{СТ}}{14,73 \cdot G_T}, \quad (1.1)$$

где $\rho_{г}$ – удельный, вес газа в рабочем участке, (кг/м³),

W_{∞} – скорость потока газа, м/сек,

$F_{СТ}$ – площадь основания стабилизатора, м²,

G_T – расход топлива через форсунки фронтного устройства, кг/сек.

Глава 3 Исследование электропроводности факела пламени неоднородной углеводородной топливно-воздушной смеси

В разделе 1 показано, что к настоящему времени нет единой теории, объясняющей механизм ионизации в зоне горения однородной смеси углеводородного топлива с воздушным потоком.

У многочисленных исследователей, занимающихся ионизацией пламени, отсутствует единое мнение об объеме зоны горения, ответственной за ионообразование в факеле пламени.

Тем сложнее оказывается создание систем контроля и управления процесса воспламенения и горения углеводородного топлива, основанные на появлении электропроводности факела пламени.

3.1 Исследование электропроводности факела пламени неоднородной смеси углеводородного топлива с воздушным потоком на моделях прямоточных камер сгорания

Результаты экспериментов на модели (смотрите рисунок 3.3), в которой электрод – стабилизатор состоял из двух обтекаемых головок, соединенных V - образной перемычкой, с подачей жидкого керосина в зоны циркуляции за головками показали, что ток проводимости в факеле пламени определяется составом смеси, взаимным расположением электрода зонда и стабилизатора-электрода, а также температурой и скоростью газового потока.

На рисунке 3.1 представлены зависимости тока от глубины погружения электрода, выполненного в виде прямого стержня, вслед за стабилизатором пламени, на рисунке 3.2 – влияние расстояния от кромок стабилизатора до электрода.

Увеличение погружения электрода приводит к значительному росту тока во всем исследованном диапазоне составов смеси. Известно, что при прочих равных условиях ток в цепи датчика зависит от площади электрода,

находящейся в зоне образования заряженных частиц и определяется в основном потоком электронов к положительному электроду датчика.

$$J = e \cdot Ke \cdot E \cdot \int n_e \cdot dF, \quad (3.1)$$

где e – заряд электрона,

Ke – подвижность электрона,

E – напряженность электрического поля,

n_e – концентрация электронов в объеме, основанием которого служит элементарная площадь поверхности электрода – dF , а высотой – средний путь электрона по направлению электрического поля.

При изменении расстояния между электродом датчика и стабилизатором (рисунок 3.2) получены различные зависимости тока по составу смеси.

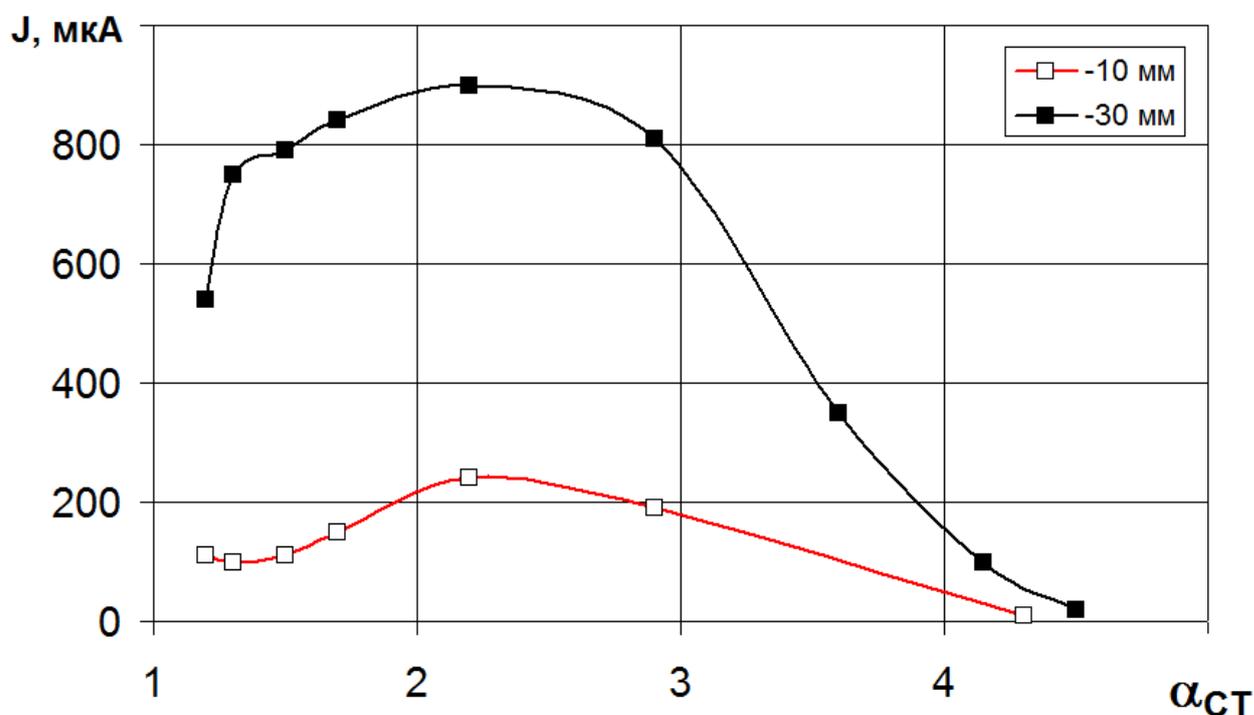


Рисунок 3.1 - Влияние заглубления электрода в след за стабилизатором на ионный ток. $T_{нач.}^* = 923$ К, $W_{\infty} = 120$ м/с, $X = 95$ мм.

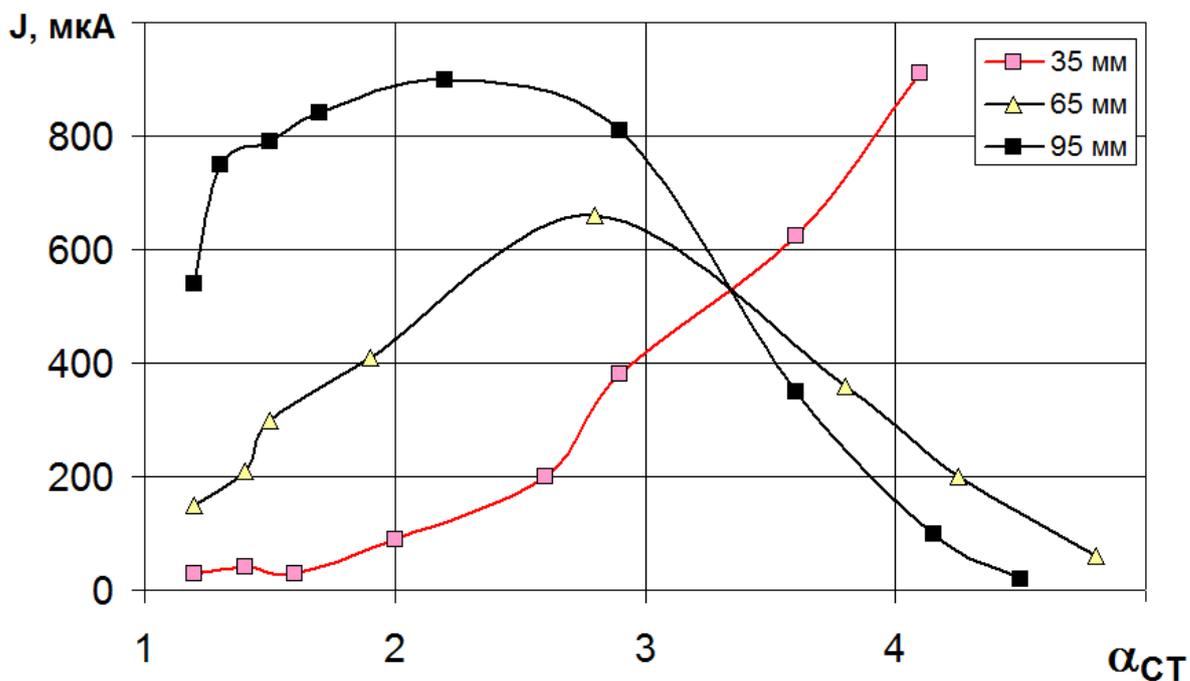


Рисунок 3.2 - Влияние расстояния между стабилизатором и электродом на ионный ток. $T_{нач.}^* = 923 \text{ К}$, $W_{\infty} = 120 \text{ м/с}$, $Y = 30 \text{ мм}$,

Для понимания механизма ионизации в пламени неоднородной топливно-воздушной смеси необходимо рассмотреть некоторые особенности, присущие процессу сжигания жидкого топлива. Впрыск топлива в зону циркуляции за плохо обтекаемым телом приводит к образованию диффузионного пламени. В отличие от гомогенных смесей, когда зона обратных токов за стабилизатором практически полностью заполнена продуктами сгорания в исследуемом случае зона циркуляции насыщена топливом, процесс горения которого протекает в объеме зоны обратных токов в местах контакта топлива и воздуха [87], где существуют необходимые условия для воспламенения образуются ТВС.

Визуальные наблюдения за процессом горения жидкого топлива, впрыснутого в зону циркуляции за стабилизатором, изображенным на рисунке 3.3 в потоке газа с температурой 923 К и скоростью 140 м/с позволяют составить следующую картину. Вблизи топливного конуса 1 в центре зоны циркуляции находится область 2 желтого свечения - свечения раскаленных частиц углерода, образующихся в результате пиролиза керосина

в паровой фазе. Область желтого свечения окружена пламенем 3, в котором на большей длине зоны циркуляции, в нашем случае 200 мм ($L_{30T} = 2,5$) преобладает зеленое свечение, обусловленное свободными радикалами C_2 . Ниже по потоку более заметным является голубой цвет пламени 4. На расстоянии 30 – 40 мм от стабилизатора толщина пламени с зеленоватым свечением составляет 10 – 15 мм. Интенсивность желтого и зеленого свечения зависит от количества топлива, впрыскиваемого в зону циркуляции. При приближении к "бедной" границе срыва интенсивность зеленого свечения ослабевает и на наиболее бедных расходах полностью исчезает. Цвет пламени становится голубовато-сиреневым. Вместе с тем имеет место свечение частиц углерода.

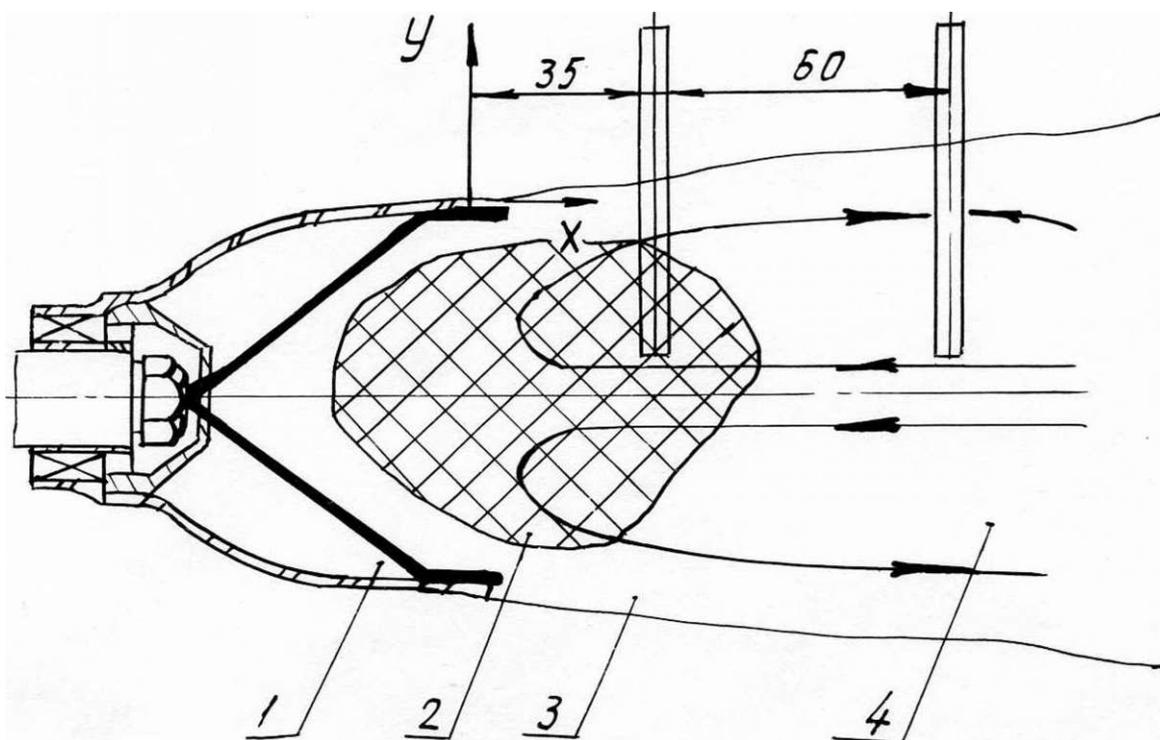


Рисунок 3.3 – Внешний вид факела пламени за головкой стабилизатора прямоточной камеры сгорания. 1 – Топливный конус, 2 – область желтого свечения, 3 – область зеленого свечения, 4 – область с голубым цветом пламени.

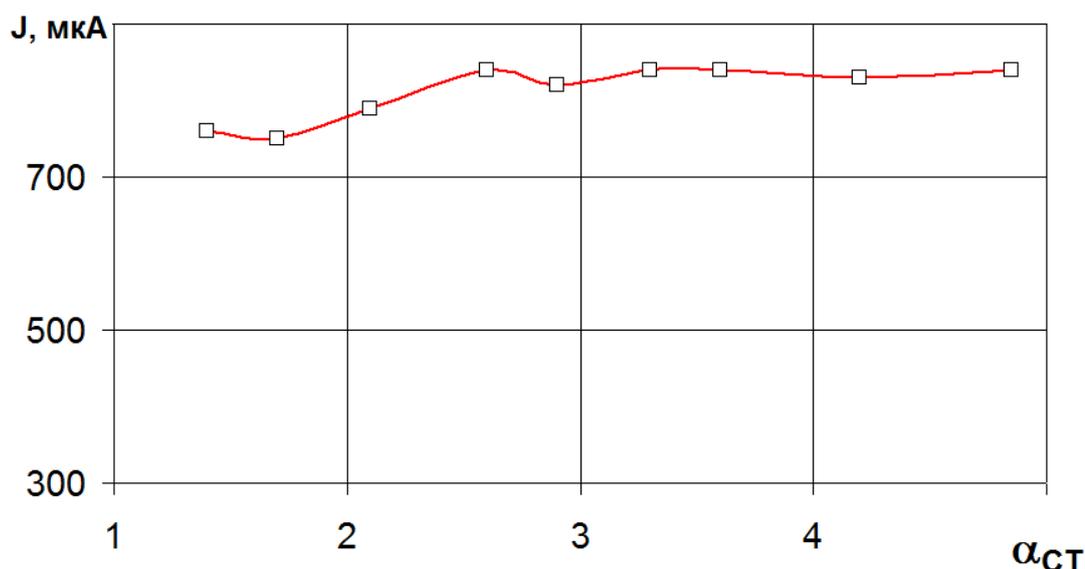


Рисунок 3.4 – Ионный ток в цепи сигнализатора горения с 2-х контактным электродом датчика. Начальная температура газа 923°K, $W_{\infty} = 120$ м/с, $X_1 = 35$ мм, $X_2 = 95$ мм.

В процессе экспериментов выполнялись измерения температуры поперек зоны циркуляции на расстоянии $X = 35$ мм (таблица 3.1) и 95 мм (таблица 3.2). По мере увеличения количества топлива температура вблизи стабилизаторов уменьшается и растет в сечении $X = 95$ мм.

Таблица 3.1 - Измерения температуры поперек зоны циркуляции на расстоянии между стабилизатором и электродом 35 мм

$\frac{\alpha_{СТ}}{Y, \text{ мм}}$	4,95	3,75	2,57	2,23	1,82	1,58	1,42	1,29
- 2	1050	620	550	525	490 •	472	460	455
- 12	1190	920	740	680	635 '	620	610	600
- 21	1215	1105	880	790	750	745	735	725
- 30	1315	1250	1025	910	815	785	775	760
- 40	-	1350	1155	1020	885	850	830	810

Таблица 3.2 - Измерения температуры поперек зоны циркуляции на расстоянии между стабилизатором и электродом 95 мм

$\frac{\alpha_{CT}}{Y, мм}$	2,23	1,82	1,58	1,42	1,29	4,95	3,75	2,57
8	525	530	540	552	562	502	506	518
- 2	715	760	-	-	-	540	600	685
- 12	1015	-	-	-	-	740	870	985
- 21	-	-	-	-	-	955	1095	1165
- 30	1360	1320	1280	1085	1025	1255	1320	1378
- 40	1400	1412	1385	1332	1260	1190	1260	1380

К настоящему времени существует несколько концепций объяснения повышенной ионизации пламени углеводородного топлива.

Согласно одной из них неравновесная ионизация в пламени возникает в результате протекания в зоне горения углеводородных топлив специфических химических реакций, приводящих к образованию ионов и свободных радикалов электронов. Кинбара и др. [88] полагает, что ионообразование происходит либо в зеленом слое, либо не посредственно: вблизи него в голубом и обусловлено присутствием радикала C_2 по схеме



Равновесная концентрация электронов в этом случае является функцией температуры, размеров, концентрации частиц углерода и начальной работы выхода электронов (1.27).

$$Ne = \frac{r \cdot 2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot k \cdot T^{3/2}}{h^3} \cdot \exp \frac{-\varphi}{k \cdot T},$$

Для частицы сферической формы показатель экспоненты в выражении (1.27) имеет вид:

$$\frac{-\varphi + f r}{k \cdot T}, \quad (3.2)$$

где

$$f r = \frac{m_0 \cdot e^2}{r}$$

m_0 – заряд частиц,

e – заряд электрона,

r – радиус частицы.

С учетом поправки на увеличение работы выхода электрона равновесная концентрация электронов Ne^* выражается следующим равенством:

$$Ne^* = Ne \cdot \exp \frac{-e \cdot m_0}{r \cdot k \cdot T}, \quad (3.3)$$

При этом в плоскости при $X = 35$ мм в зоне горения зарегистрированы более высокие температуры и большая поверхность электрода находится в этой зоне.

При увеличении расхода топлива ток проводимости в сечении $X = 35$ мм падает, а в сечении $X = 95$ мм растет. Визуальными наблюдениями установлено при этом возрастание яркости желтого свечения и появление зеленого свечения. Температура в сечении $X = 35$ мм падает, а в сечении $X = 95$ мм растет. Следовательно, падение тока вблизи стабилизатора обусловлено уменьшением концентрации электронов, испускаемых с поверхности твердых частиц углерода, вследствие понижения их температуры и уменьшения поверхности электрода, находящегося в зоне горения.

О доминирующей роли термоэмиссии электронов свидетельствует влияние погружения электрода в след за стабилизатором на величину тока. При выдвижении электрода ток проводимости падает и при $h = 10$ мм когда конец электрода находится в слое с зеленым свечением (где нет частиц твердого углерода), уменьшается в зависимости от состава смеси в 3 – 6 раз по сравнению с погружением 30 мм.

Характеристики двухконтактного датчика в значительно меньшей степени зависят от изменения Физических параметров набегающего потока [88]. При изменении скорости газа со 120 до 150 м/с на режиме розжига ток уменьшается с 800 до 720 мкА, а снижение начальной температуры газа с 650° до 250°C к уменьшению тока с 950 до 700 мкА.

На рисунке 3.5 приведены зависимости ионного тока от величины погружения L-образного электрода 3, часть которого длиной 54 мм направлена вдоль потока, в след за стабилизатором. По-видимому минимальная величина тока проводимости при $Y < 0$ определяется частью поверхности электрода, перпендикулярной потоку газа и пересекающей зону максимальной концентрации заряженных частиц.

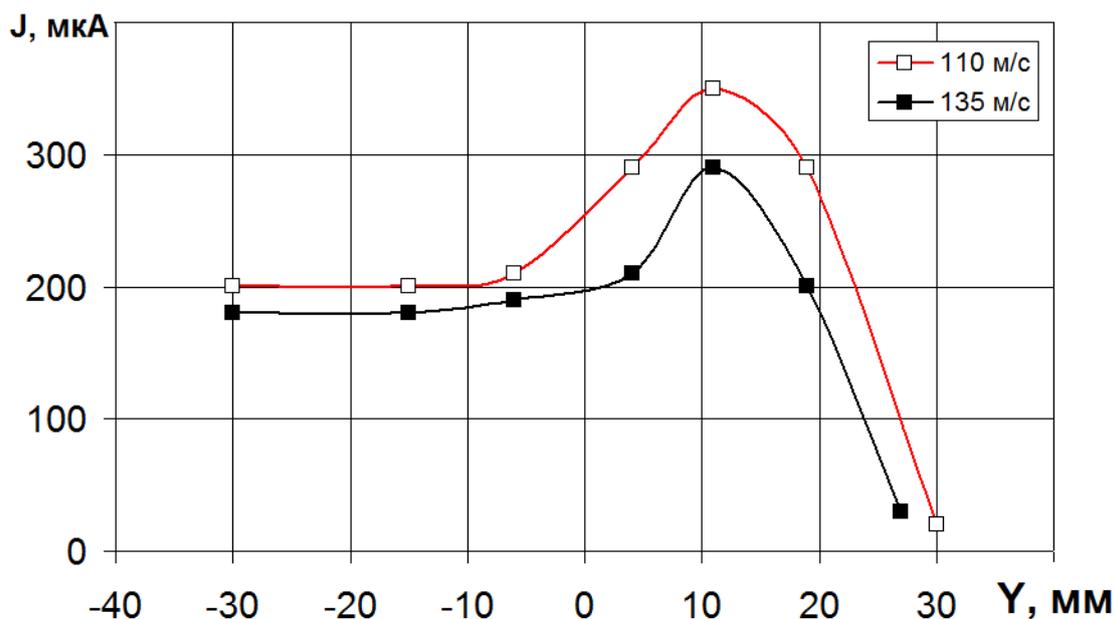


Рисунок 3.5 - Ток проводимости в зависимости от погружения L-образного электрода относительно кромки основания стабилизатора при двух скоростях потока, $W_\infty = 110$ и 135 м/с, и $T_2^* = 923$ К, $X = 60$ мм, $\alpha_{CT} = 4,35$.

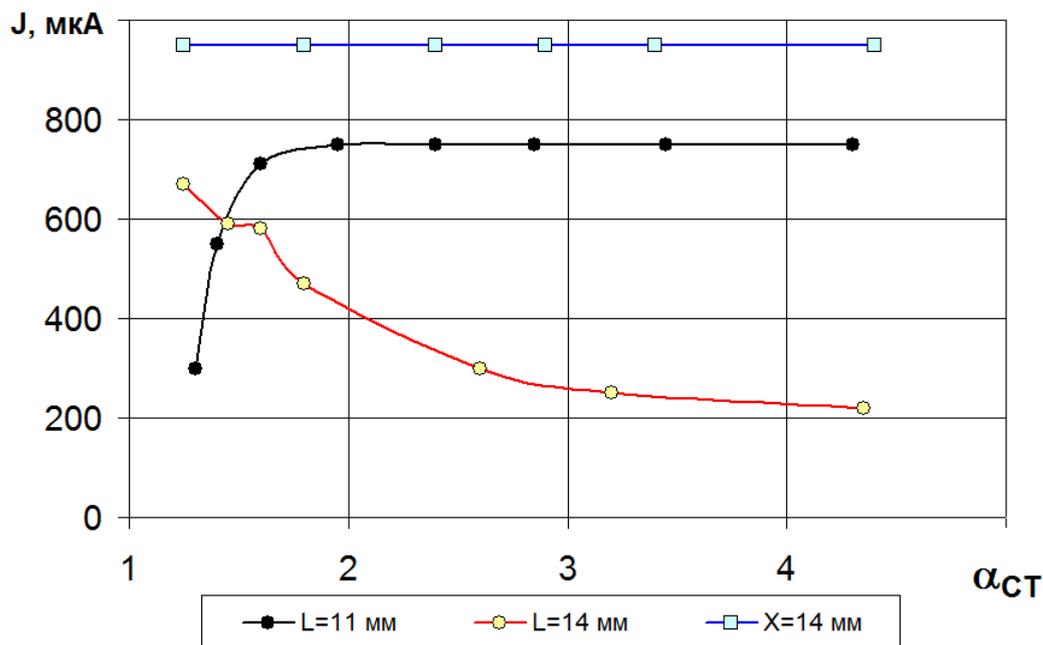


Рисунок 3.6 - Ток проводимости в цепи сигнализаторов горения с электродами различной формы при впрыске керосина на стабилизатор, при $T_2^* = 923$ К, $W_\infty = 110$ м/с. Погружение электрода относительно кромки основания стабилизатора Y , мм: 11 мм - (—●—), 14 мм - (—■—), (—□—). Двухконтактный $X_1 = 40$ мм, $X_2 = 100$ мм (—□—); L-образный $X = 40$ мм: (—■—, —●—).

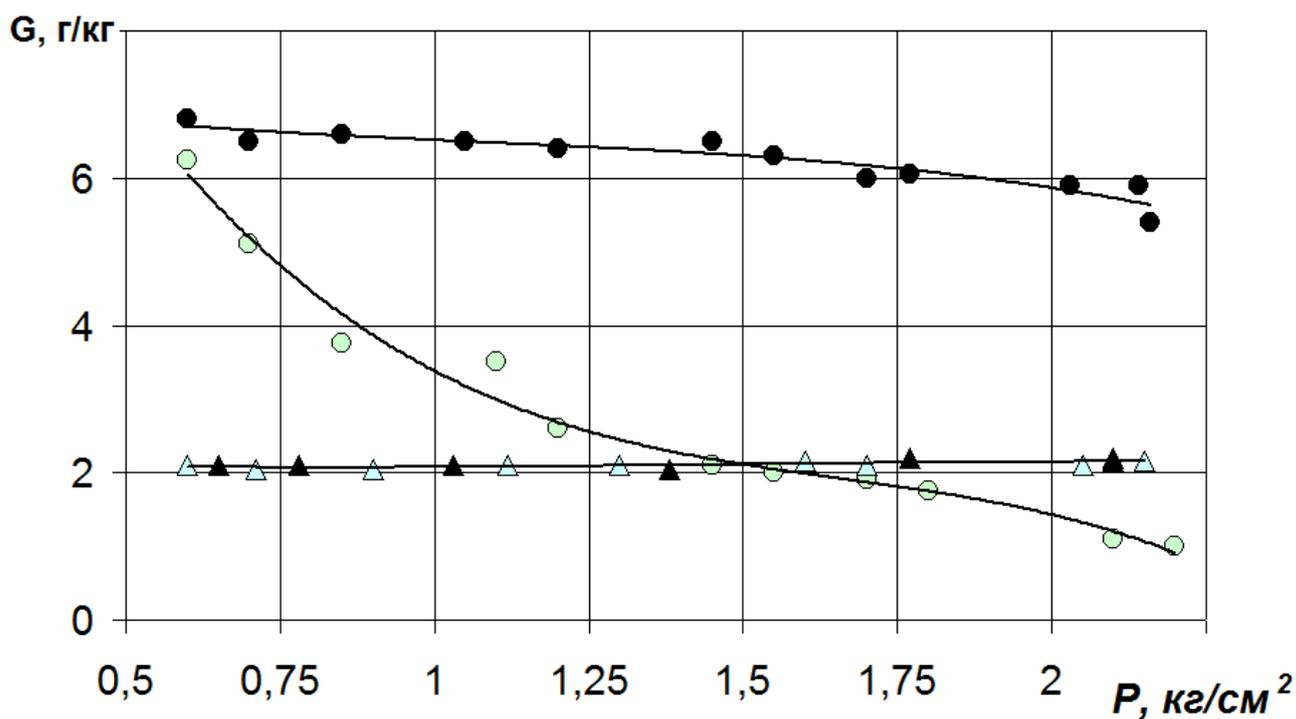
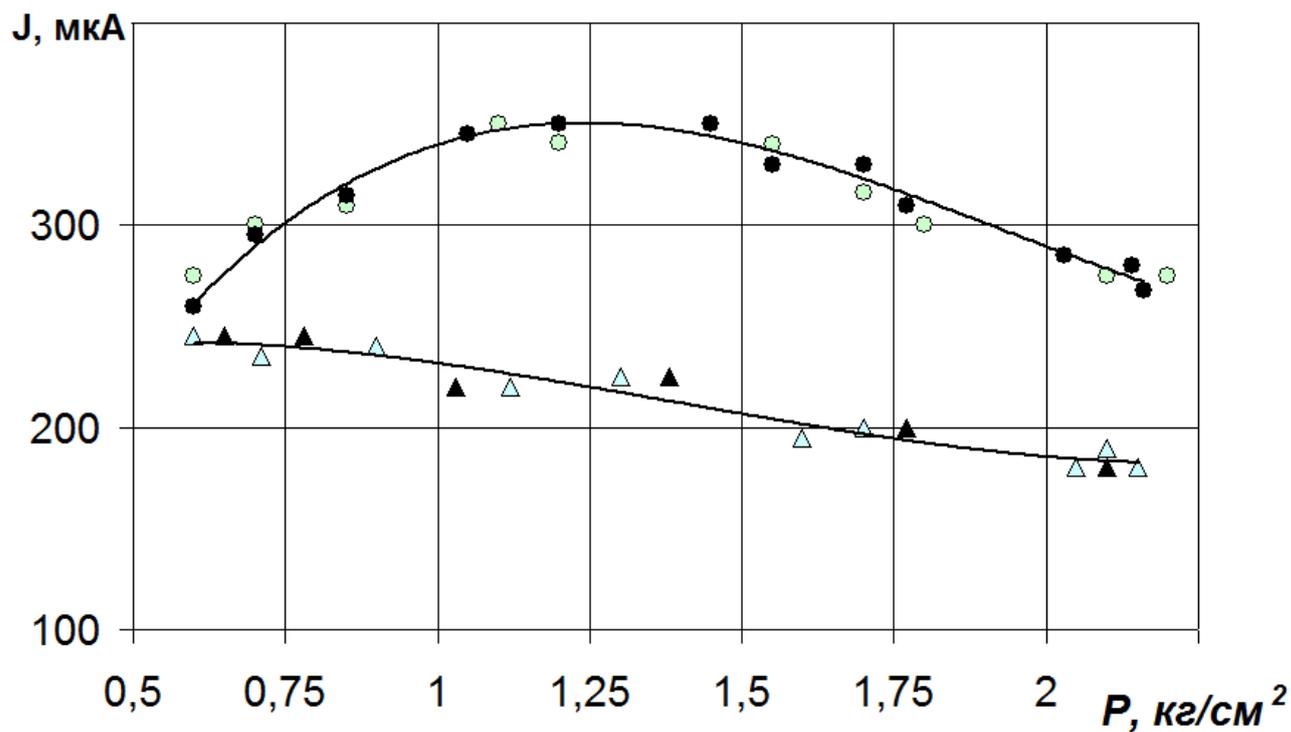


Рисунок 3.7 - Зависимость тока проводимости от давления газа и состава смеси в прямооточной камере сгорания. Сигнализаторы горения: с двухконтактным электродом в затурбинной части прямооточной камерой сгорания - \circ , \bullet ; с электродом прямым стержнем за прямооточной камерой сгорания - \triangle , \blacktriangle . Минимальный форсажный режим - \circ , \triangle . Максимальный форсажный режим - \bullet , \blacktriangle .

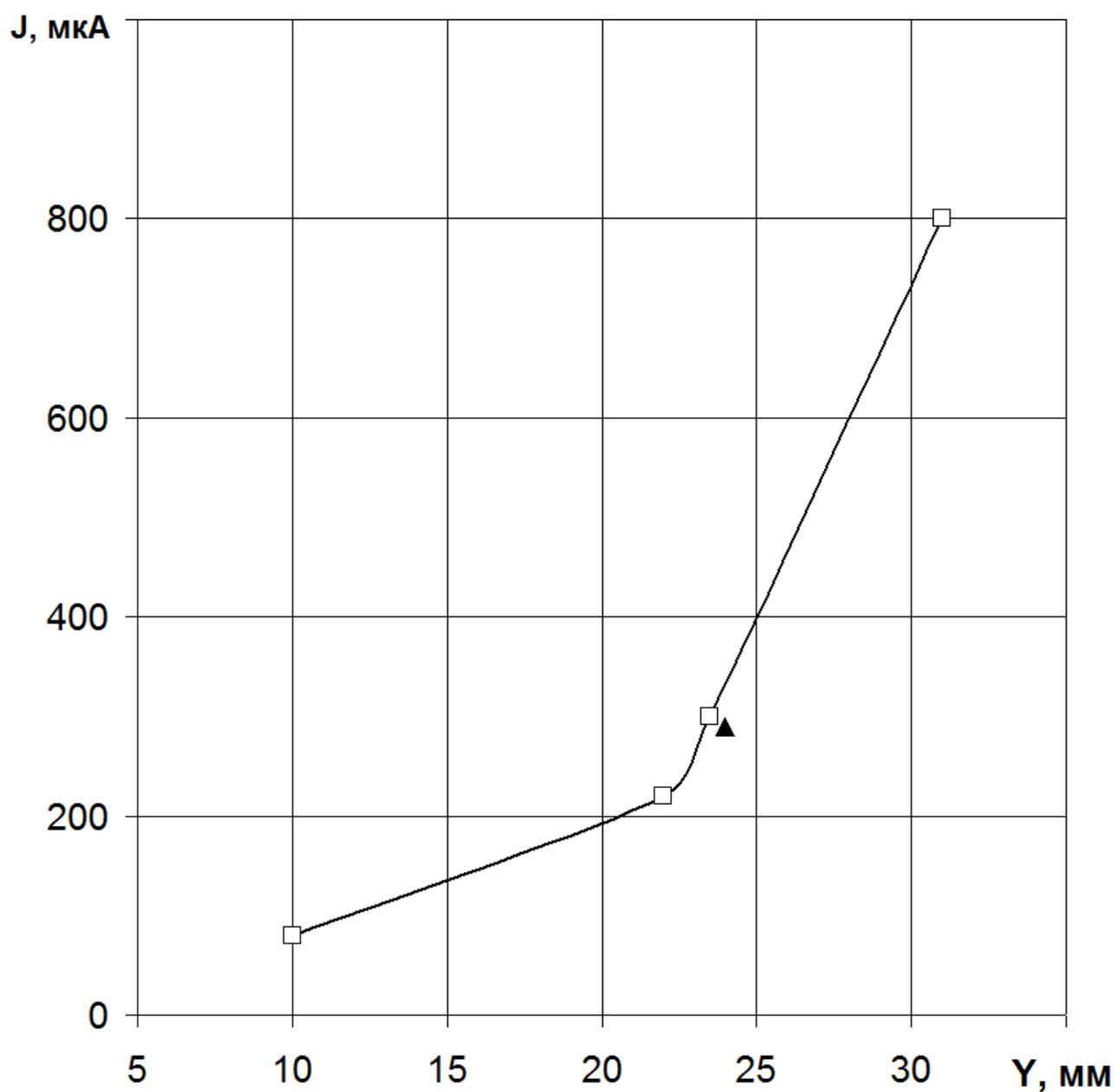


Рисунок 3.8 - Сравнение результатов экспериментов на модели и на полноразмерной прямооточной камере сгорания. Электрод датчика двухконтактный, □ - модель, ▲ - полноразмерная прямооточная камера сгорания

На рисунке 3.9 показано протекание давления топлива в коллекторе и тока проводимости при включении прямооточной камеры сгорания после

работы на максимальном режиме в течение 300 сек по схеме максимальный режим соответствует 78° .

На режиме $\alpha_{руд} = 78^{\circ}$ в топливный коллектор II контура подается минимальный расход топлива ($G_{Тмин}$). В первую очередь ток проводимости появляется в цепи сигнализатора, электрод которого установлен на расстоянии 510 мм от подвода топлива в коллектор. В последнюю очередь появление тока фиксируется сигнал в цепи - массы с электродом, установленным за форсункой, противоположной подводу топлива, расстояние 975 мм от подвода топлива. Изменение тока во времени происходит в соответствии с изменением давления топлива перед форсунками коллектора. Минимальному расходу топлива при включении прямоточной камеры (~ 1300 кг/час) соответствует перепад давления на форсунках ~ 4 кг/см². Заброс давления топлива до 20 кг/см и выше при подаче $G_{Тмин}$ в горячий коллектор, имеющий температуру стенок 550-650°C, обусловлен вскипанием топлива в момент поступления в коллектор.

Визуальные наблюдения за процессом воспламенения топливно-воздушной смеси за кольцевыми стабилизаторами затурбинного контура прямоточных камер сгорания показали, что раньше всего воспламенение топлива происходит в месте подвода топлива к коллектору. Затем пламя растекается влево и вправо по кольцу стабилизатора и смыкается в точке, противоположной вводу топлива в коллектор. При включении прямоточной камеры с прогретыми коллекторами после смыкания в месте, противоположном вводу топлива в коллектор, происходит частичный срыв горения на секторе стабилизатора, протяженность которого определяется расходом топлива через коллектор и временем работы изделия на максимальном бесфорсажном режиме, т.е. от степени нагрева стенок коллектора. Через некоторое время (максимальное время исчезновения ионного тока при этом составляет ($\sim 0,3$ с) горение в этом месте восстанавливается.

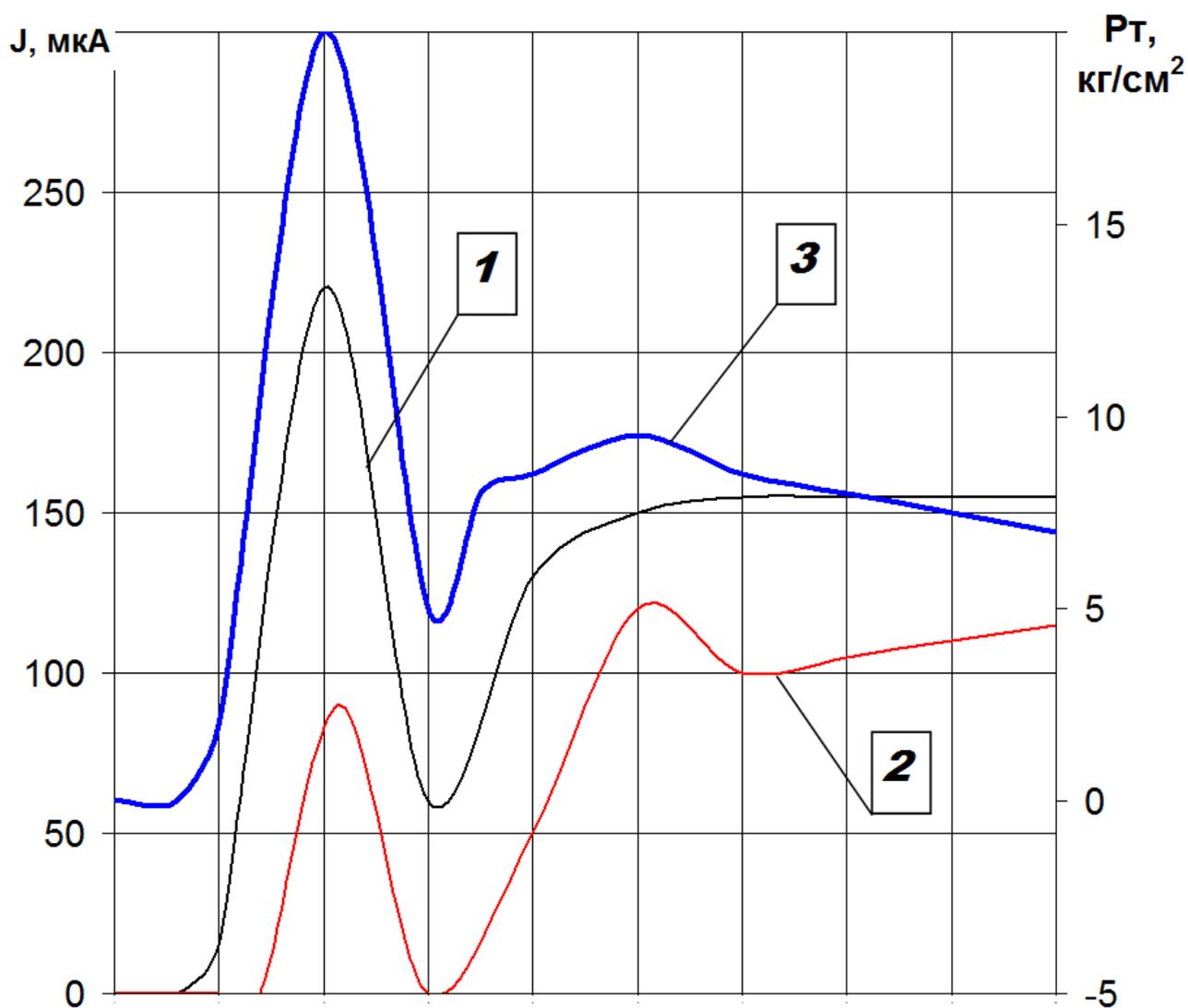


Рисунок 3.9 - Динамика воспламенения топлива за кольцевым стабилизатором при подаче топлива в кольцевой "горячий" коллектор. Сигнализатор горения с двухконтактным электродом зонда. Погружение электрода в след за стабилизатор 15 мм. Расход топлива 1650 кг/час. 1, 2 - ионные токи, 3 - давление топлива. Расстояние от ввода топлива в коллектор до форсунки против электрода зонда, мм: 510 - 1, 975 - 2.

Результаты визуального наблюдения и анализ осциллограмм изменения давления и температуры топлива в коллекторах, установленных в затурбинном контуре прямоточной камеры сгорания, позволяют выявить

следующую картину динамики воспламенения топливно-воздушной смеси при впрыске топлива через "горячие" коллекторы:

1. При поступлении в "горячий" коллектор топливо вскипает, а так как прямооточный регулятор выдает расход, то происходит возрастание давления парогазовой смеси в коллекторе. Газ, который был в коллекторе, вытесняется через форсунки потоком парожидкостной смеси, заполняющей коллектор. По мере заполнения коллектора парожидкостной смесью топлива происходит процесс воспламенения топливно-воздушной смеси вдоль кольца стабилизатора, и одновременно охлаждение стенок коллектора.

2. Охлаждение стенок коллектора и высокое давление приводит к подавлению процесса кипения в коллекторе и давление в коллекторе падает. При этом через форсунки, противоположные подводу топлива в коллектор, в зону циркуляции за стабилизатором поступает смесь топлива с газом, полностью не вытесненным из коллектора к этому моменту времени, при пониженном давлении. Это вызывает - местный бедный срыв пламени. Устойчивое горение вдоль всего кольца стабилизатора восстанавливается к моменту полного заполнения коллектора жидким топливом.

Провал величины ионного тока и его длительность по времени при включении прямооточной камеры сгорания определяется расходом топлива, степенью прогрева стенок коллектора обтекающим затурбинным газом и расположением электрода стабилизатора горения относительно места ввода топлива в коллектор. Так при установке электрода на расстоянии 46 мм от подвода топлива вдоль коллектора максимальный провал тока проводимости составлял 30 % от максимального уровня. С удалением ионизационного датчика от подвода топлива величина и длительность провала тока изменяются таким образом, что ток может уменьшаться до нуля.

Включение прямооточной камеры с холодными коллекторами (время работы на максимальном прямооточном режиме 30 и 60 сек) происходят без заброса давления топлива в коллекторе. Протекание тока проводимости при воспламенении топливно-воздушной смеси за стабилизатором в этом случае

одинаковое при установке электрода в любом месте за стабилизатором. Наблюдается лишь возрастающая разница появления сигнала во времени по мере удаления электрода от места ввода топлива в коллектор по сравнению со случаем размещения электрода непосредственно у ввода топлива.

При выключении подачи топлива в коллекторы, впрыскивающие топливо в зону стабилизаторов, где установлены электроды сигнализаторов пламени горения, ток проводимости исчезает за 0,1 сек.

Длительные 200 и 600 часовые испытания показали, практическую неизменность уровня тока проводимости и повторяемость характера его протекания во времени при включении прямоточной камеры сгорания.

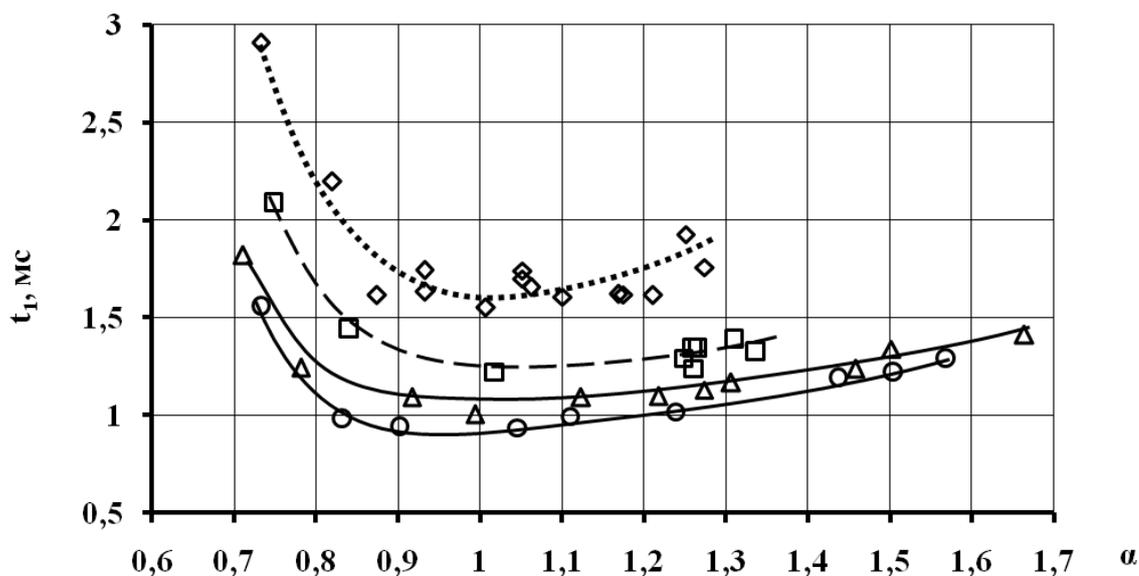
Работы, проведенные по определению возможности охлаждения электрода, устанавливаемого в область высоких температур, воздухом вентиляторного контура [90] показали, что охлаждение не влияет на уровень тока проводимости и позволяет понизить температуру степени стенки электрода на 300 С.

Глава 4 Хемионизация в пламени топливно-воздушной смеси в ДВС с искровым зажиганием

4.1 Зависимость интервала от момента подачи искры до появления сигнала на датчике, при варьировании составом топливно-воздушной смеси при работе на СПГ и СПГ с добавками водорода

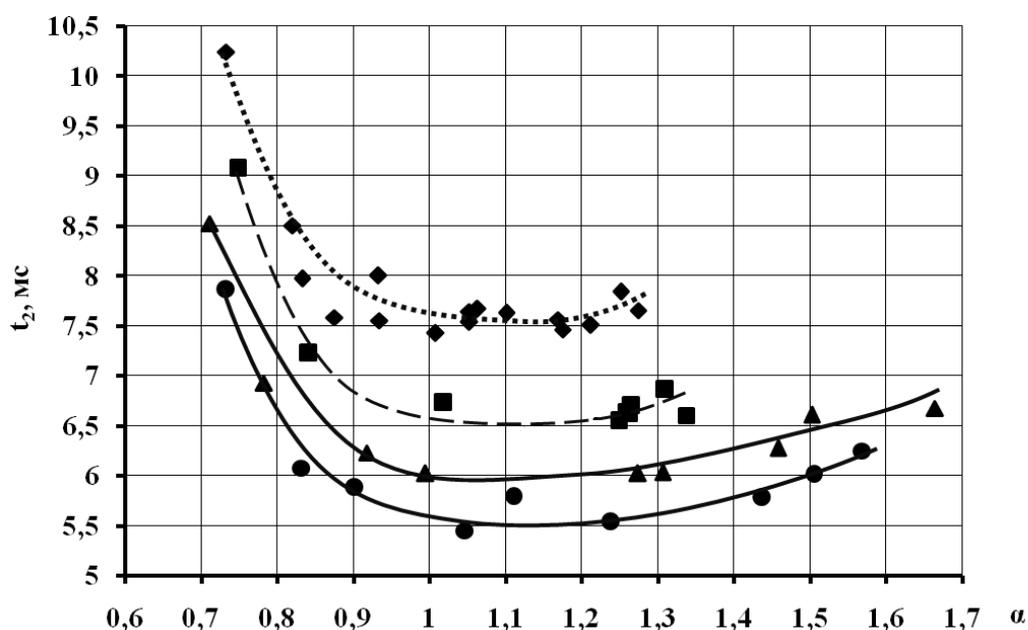
Появление сигнала на датчиках ионизации характеризует наличие процесса сгорания в этой зоне, следовательно появление сигнала на датчике характеризует время появления пламени от начала сгорания до распространения его в зону датчика ионизации. По этому на рисунках 4.1 – 4.4 приведено время появления сигнала, характеризующего наличие хемионизации в зоне датчика, как интервал от момента подачи искры до появления сигнала на датчике, характеризующем первую или основную фазу сгорания при работе на сжатом природном газе или сжатом природном газе с активизирующими интенсивность процесса сгорания добавками водорода, для двух скоростных режимов работы двигателя.

Анализ рисунков 4.1 - 4.4 показал наличие связи интервала времени от момента подачи искры до появления сигнала на датчике, характеризующем первую или основную фазу сгорания при работе на сжатом природном газе или сжатом природном газе с активизирующими интенсивность процесса сгорания добавками водорода, с составом ТВС, как по отношению воздуха к топливу, так и в отношении изменения удельного содержания водорода в топливе, для постоянного угла опережения зажигания. Из рисунков 4.1 - 4.4 можно увидит, что не смотря на изменение частоты вращения минимум по коэффициенту избытка воздуха приходится в зону стехиометрического состава смеси, а при обогащении или обеднении смеси, продолжительность сгорания монотонно возрастает.



◇ – $r_{H_2}=0\%$; □ – $r_{H_2}=29\%$; Δ – $r_{H_2}=47\%$; ○ – $r_{H_2}=58\%$.

Рисунок 4.1 – Интервал от момента подачи искры до появления сигнала на датчике, характеризующем первую фазу сгорания, при варьировании составом топливно-воздушной смеси при работе на СПГ и СПГ с добавками водорода ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$)



◆ – $r_{H_2}=0\%$; ■ – $r_{H_2}=29\%$; ▲ – $r_{H_2}=47\%$; ● – $r_{H_2}=58\%$.

Рисунок 4.2 – Интервал от момента подачи искры до появления сигнала на датчике, характеризующем основную фазу сгорания, при варьировании составом топливно-воздушной смеси при работе на СПГ и СПГ с добавками водорода ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$)

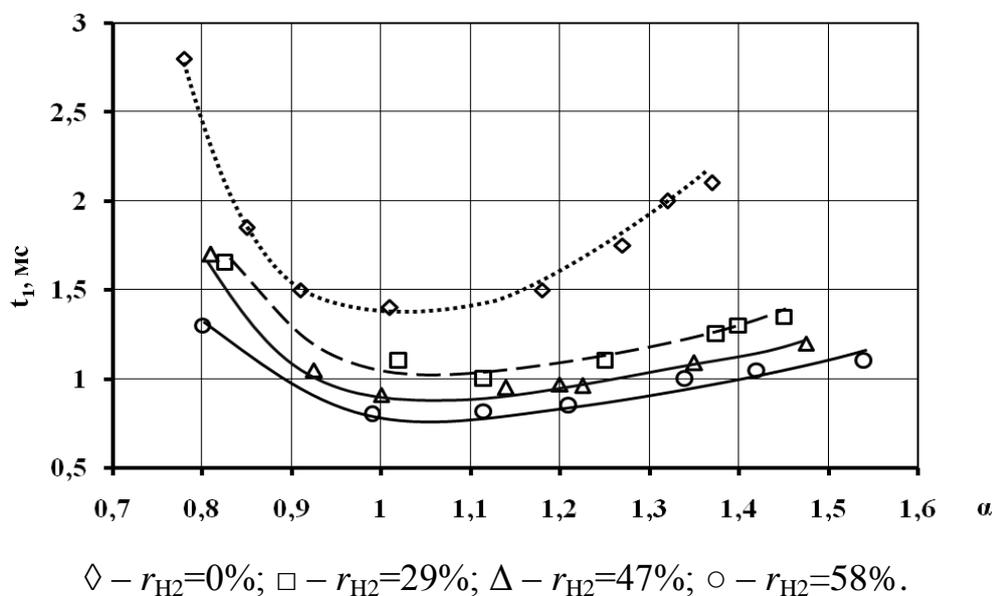


Рисунок 4.3 – Интервал от момента подачи искры до появления сигнала на датчике, характеризующем первую фазу сгорания, при варьировании составом топливно-воздушной смеси при работе на СПГ и СПГ с добавками водорода ($n = 900 \text{ мин}^{-1}$)

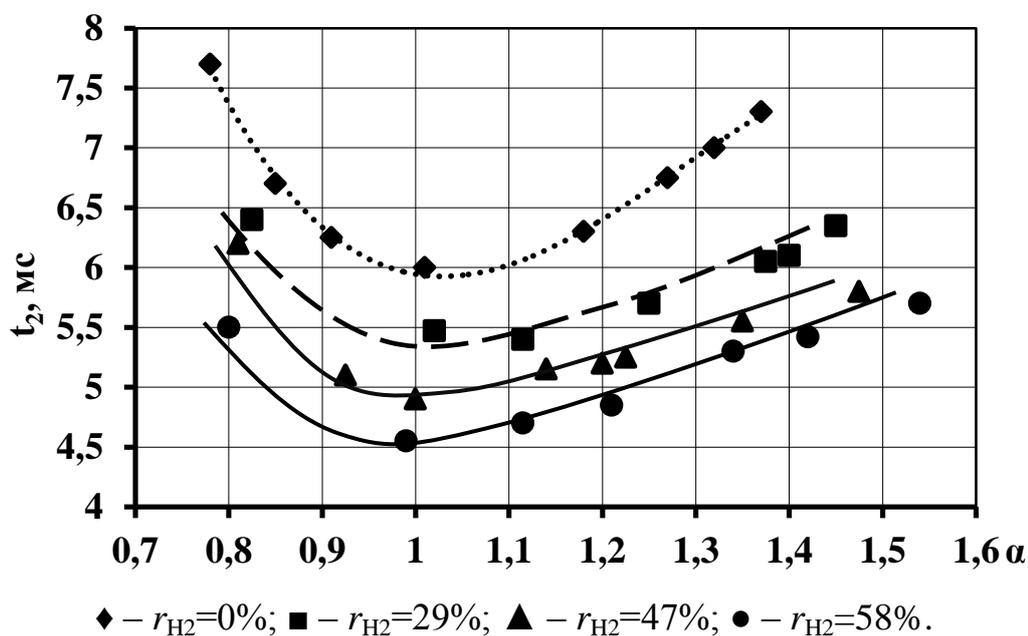


Рисунок 4.4 – Интервал от момента подачи искры до появления сигнала на датчике, характеризующем основную фазу сгорания, при варьировании составом топливно-воздушной смеси при работе на СПГ и СПГ с добавками водорода ($n = 900 \text{ мин}^{-1}$)

Проводя анализ длительности протекания фаз сгорания в зависимости от частоты вращения коленчатого вала, мы наблюдаем, что с увеличением частоты вращения с 600 мин^{-1} до 900 мин^{-1} продолжительность сократилась на 22% для стехиометрического состава смеси при работе на природном газе, а для основной фазы снижение составило 17%. При этом для более богатых или бедных смесей эта разница монотонно уменьшается и для составов смеси $\alpha = 1,3$ уже составляет 8 и 7% соответственно. Также следует отметить, что при увеличении частоты вращения с 600 до 900 мин^{-1} угловая скорость возросла в полтора раза, следовательно увеличение частоты вращения приводит к удлинению фаз сгорания по углу поворота коленчатого вала.

Рассматривая и анализируя влияние добавки водорода на продолжительность фаз сгорания следует отметить, что наибольшее относительное влияние оказывает добавка первых 29% объемных долей водорода в природный газ, дальнейшее увеличение доли водорода, больше характеризуется эффектом замещения одного топлива другим, а следовательно и равномерным изменением параметров при дальнейшем увеличении доли водорода [1-4].

4.2 Зависимость продолжительности сигнала электропроводности пламени от отношения воздуха к топливу и состава газового топлива характеризующимся изменением доли водорода в нем

Продолжительность сигнала электропроводности пламени показывает скорость протекания реакций окисления в зоне установки ионизационного датчика. По этому этот параметр является весьма важен для корректной оценке характеристик распространения пламени в период воспламенения и в период догорания, как наиболее ответственные моменты процесса сгорания которые определяют условия образования токсичных компонентов во фронте пламени.

По этому была проведена оценка продолжительности усредненного сигнала по серии циклов на каждом режиме работы двигателя, это позволило получить графики представленные на рисунках 4.5 и 4.6, где показано влияние отношения воздуха к топливу и объемной доли водорода в смеси с природным газом, на продолжительность сигнала электропроводности пламени для первого датчика, характеризующего начальную фазу сгорания (рисунок 4.5) и второго датчика ионизации характеризующего основную фазу сгорания (рисунок 4.6) для частоты вращения 600 мин^{-1} .

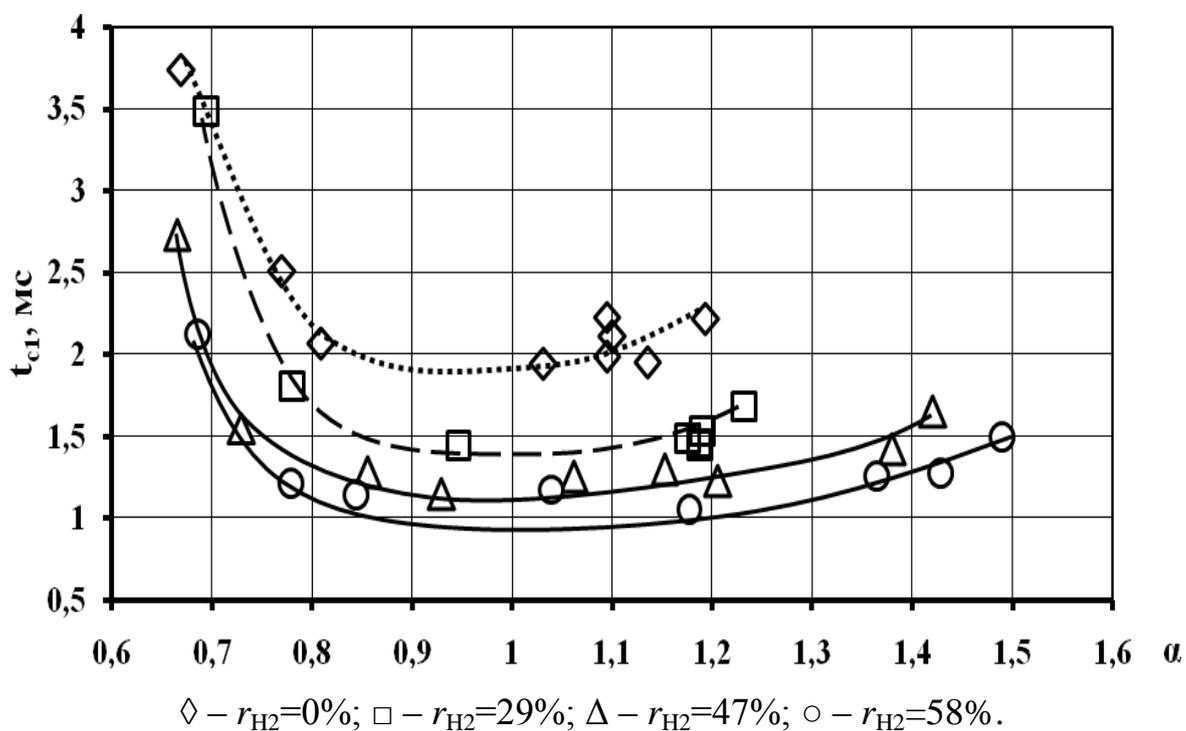


Рисунок 4.5 – Зависимость продолжительности сигнала электропроводности пламени в первой фазе сгорания (t_{c1}) от отношения воздуха к топливу и состава газового топлива характеризующимся изменением доли водорода в нем

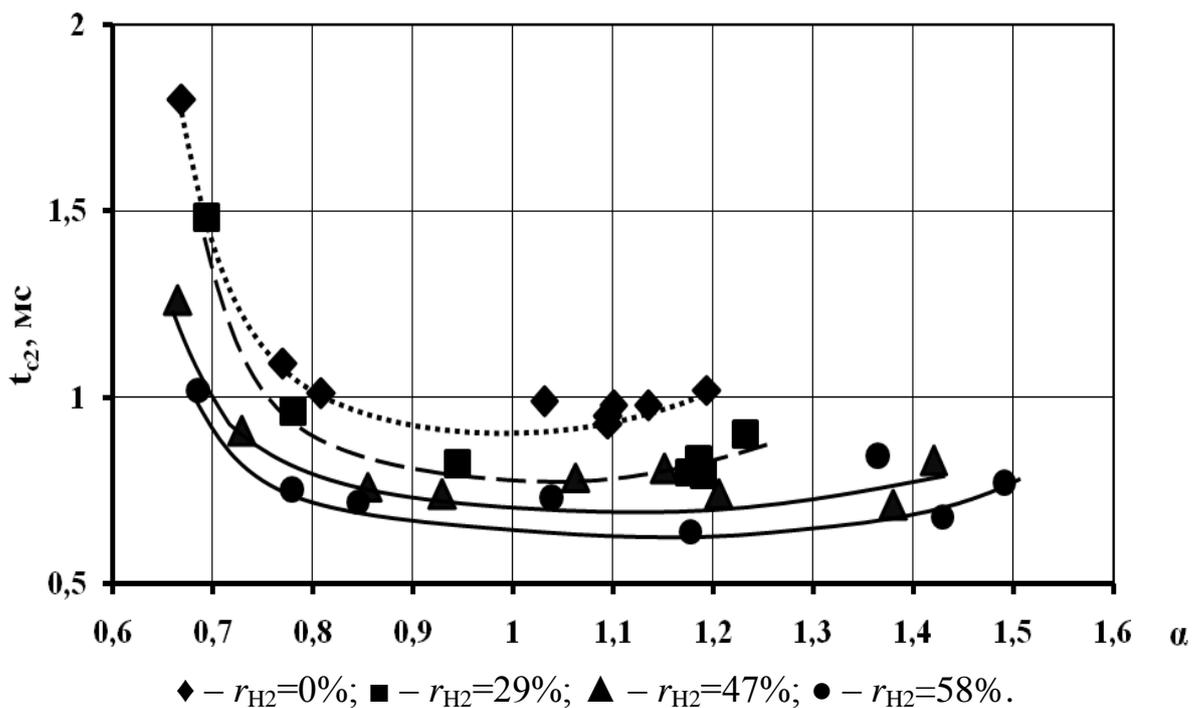


Рисунок 4.6 – Зависимость продолжительности сигнала электропроводности пламени в основной фазе сгорания (t_{c2}) от отношения воздуха к топливу и состава газового топлива характеризующимся изменением доли водорода в нем

Для рисунка 4.5 следует отметить что на участке от 0,9 до 1,1 по коэффициенту избытка воздуха продолжительность сигнала электропроводности пламени практически не меняется и зависит в большей степени от объемной доли водорода в смеси с природным газом. При этом при обеднении смеси продолжительность сигнала увеличивается слабо, а в тоже время при обогащении смеси, более чем 0,9 идет значительное увеличение продолжительности сигнала электропроводности пламени, что можно объяснить увеличением концентрации топлива во фронте пламени, при снижении скорости сгорания, что приводит к значительному росту толщины фронта пламени и следовательно длительности его горения. Полученные результаты для датчика характеризующего первую фазу сгорания, также во многом отражаются и на датчике характеризующем основную фазу сгорания и распространение фронта пламени в

заключительной фазе сгорания (рисунок 4.6). Но в этом случае на характеристику распространения пламени уже большее влияние оказывают изменение параметров турбулентности потока и термодинамическая неидентичность оцениваемых процессов, по сравнению с распространением фронта пламени в первой фазе сгорания, где различия по турбулентности и термодинамическим условиям сгорания минимальны.

Увеличение объемной доли водорода, также оказывает влияние на сокращение продолжительности сигнала электропроводности пламени, и также можно отметить что добавка первых 29% объемных долей водорода оказывает большее влияние на сокращение длительности сигнала, чем последующее увеличение доли водорода в топливе [5-9].

Следовательно показано, что параметр электропроводности пламени имеет четкую корреляцию с составом смеси по коэффициенту избытка топлива и по объемной доли водорода в смеси с природным газом, что говорим о возможностях применения данного параметра для оценки протекания рабочего процесса в серийных двигателях.

4.3 Характеристики амплитуду сигнала электропроводности пламени

Параметры электропроводности пламени характеризуются не только временем появления сигнала или продолжительностью этого сигнала, также важной характеристикой протекания процесса сгорания в зоне установки датчика ионизации является характеристика изменения амплитуды сигнала электропроводности пламени. Данная характеристика является более точной в смысле разброса параметров при усреднении на одном режиме работы двигателя по сравнению с длительностью сигнала электропроводности, но менее точной по сравнению с разбросом параметров времени появления сигнала на датчике ионизации. В тоже время эта характеристика показывает интенсивность протекания химических реакций в зоне электрода датчика ионизации.

По этому для представления влияния состава смеси по коэффициенту избытка воздуха и объемному содержанию водорода в нем представлены на рисунках 4.7 - 4.10 графики изменения амплитуды электропроводности пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

В результате проведенных исследований были получены значения ионных токов, при работе экспериментальной установки на разных скоростных режимах, добавках водорода и составе ТВС.

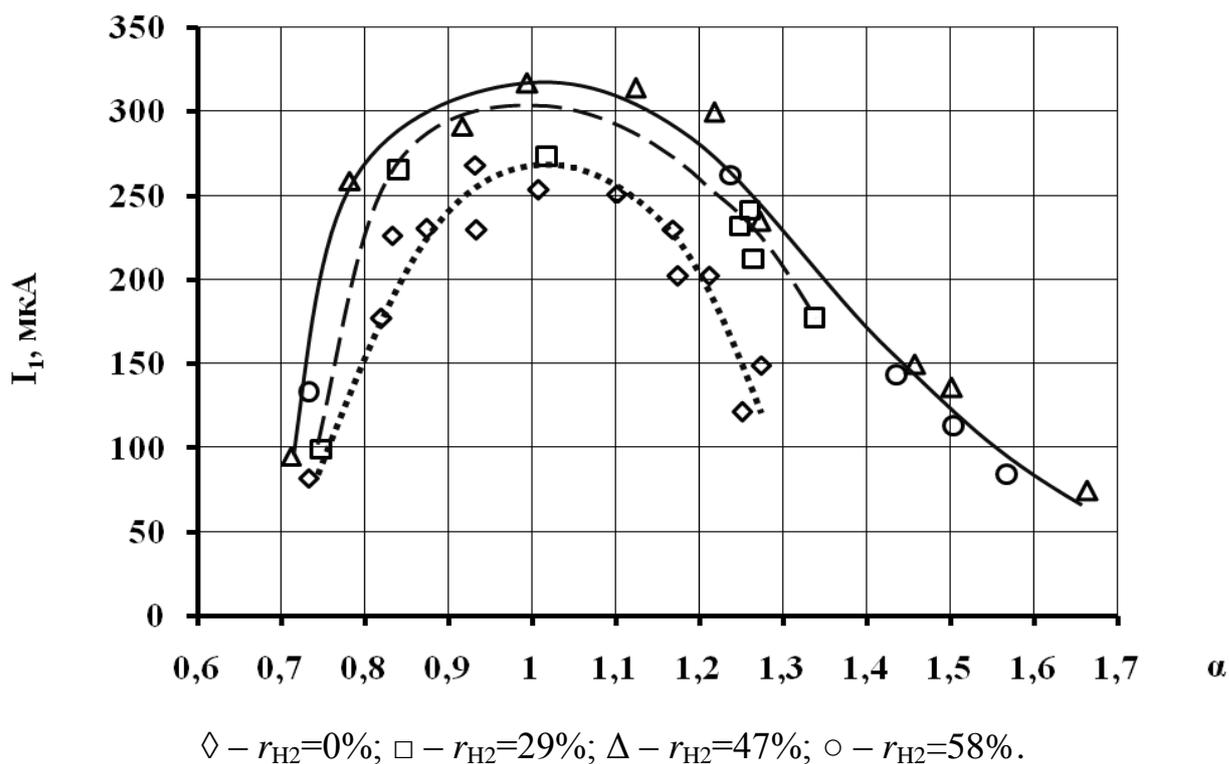


Рисунок 4.7 – Графики изменения амплитуды электропроводности пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха, для первого датчика у свечи зажигания, при варьировании объемной доли водорода в смеси с природным газом при частоте вращения 600 мин^{-1}

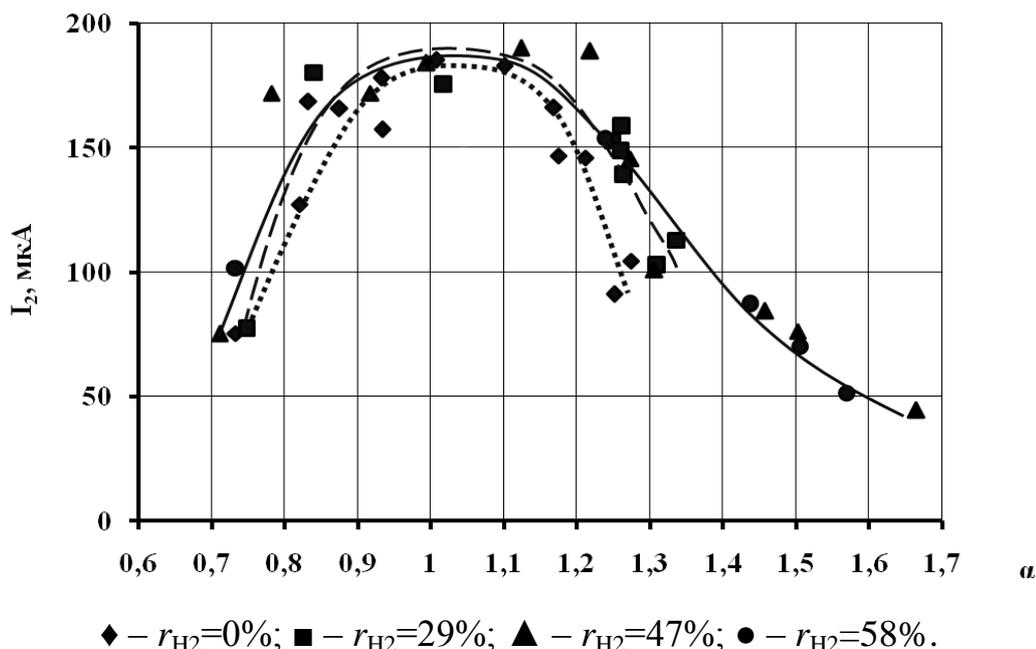


Рисунок 4.8 – Графики изменения амплитуды электропроводности пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха, для второго датчика в удаленной части камеры сгорания, при варьировании объемной доли водорода в смеси с природным газом при частоте вращения 600 мин^{-1}

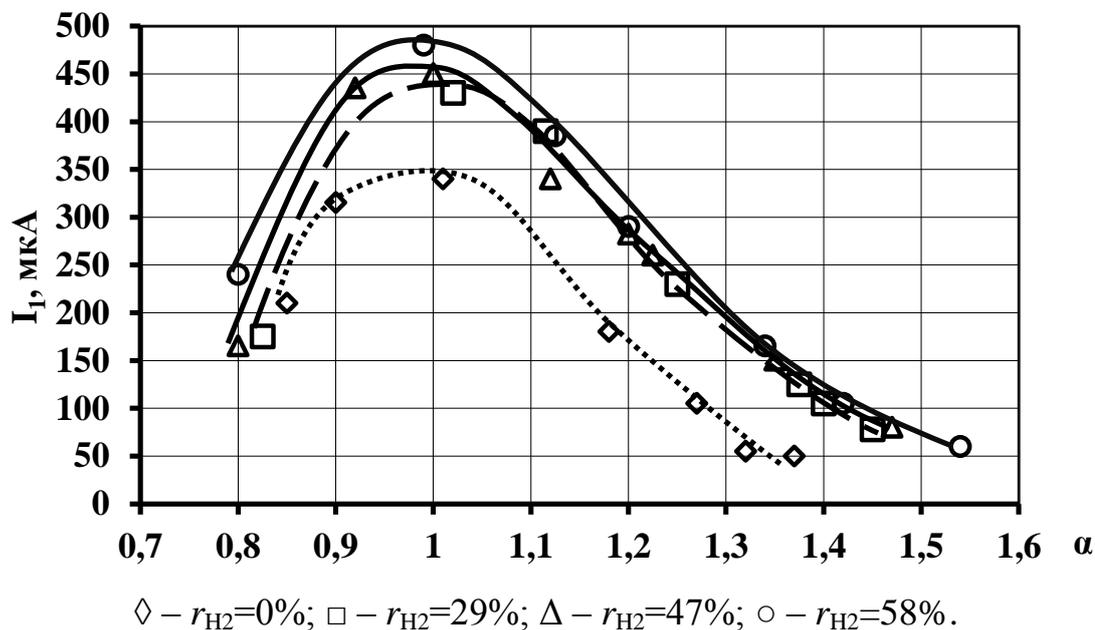


Рисунок 4.9 - Графики изменения амплитуды электропроводности пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха, для первого датчика у свечи зажигания, при варьировании объемной доли водорода в смеси с природным газом при частоте вращения 900 мин^{-1}

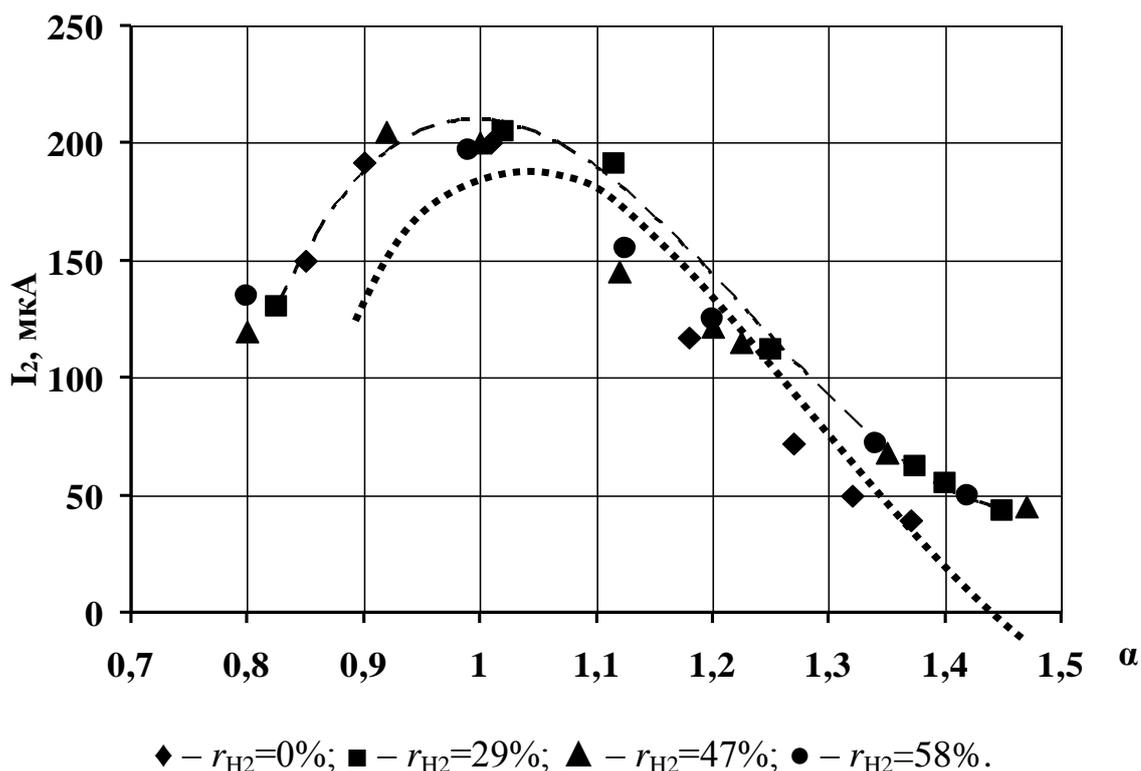


Рисунок 4.10 – Графики изменения амплитуды электропроводности пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха, для второго датчика в удаленной части камеры сгорания, при варьировании объемной доли водорода в смеси с природным газом при частоте вращения 900 мин^{-1}

Как видно из рисунков, зависимость величины тока на ИД от коэффициента избытка воздуха имеет примерно одинаковую форму для всех изученных скоростных режимов и добавках водорода. Максимальные значения тока приходятся на области, близкие стехиометрическому составу смеси ($\alpha=1$).

Результаты исследований показывают, что с увеличением частоты вращения КВД с 600 до 900 мин^{-1} происходит возрастание ионных токов в обеих фазах сгорания. Так, при отсутствии добавок водорода, прирост тока в первой фазе сгорания (I_1) при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ составил 27% , а во второй фазе сгорания (I_2) 14% .

4.4 Зависимость ионного тока от состава бензоводородовоздушной смеси и частоте вращения КВ

При использовании датчика ионизации получены значения амплитуды ионного тока для двух электродов датчика ионизации. Характер изменения величины ионного тока от коэффициента избытка воздуха описан во многих работах [92, 93,94,95-97].

Для проверки адекватности полученных значений построены графики зависимости максимума ионного тока от состава бензоводородовоздушной смеси и частоты вращения коленчатого вала двигателя, которые представлены на рисунке 4.11 и 4.12. Вследствие пропорциональности токов ионизации первого и второго зондов, на рисунках представлены зависимости тока ионизации, возникающего на первом электроде ИД.

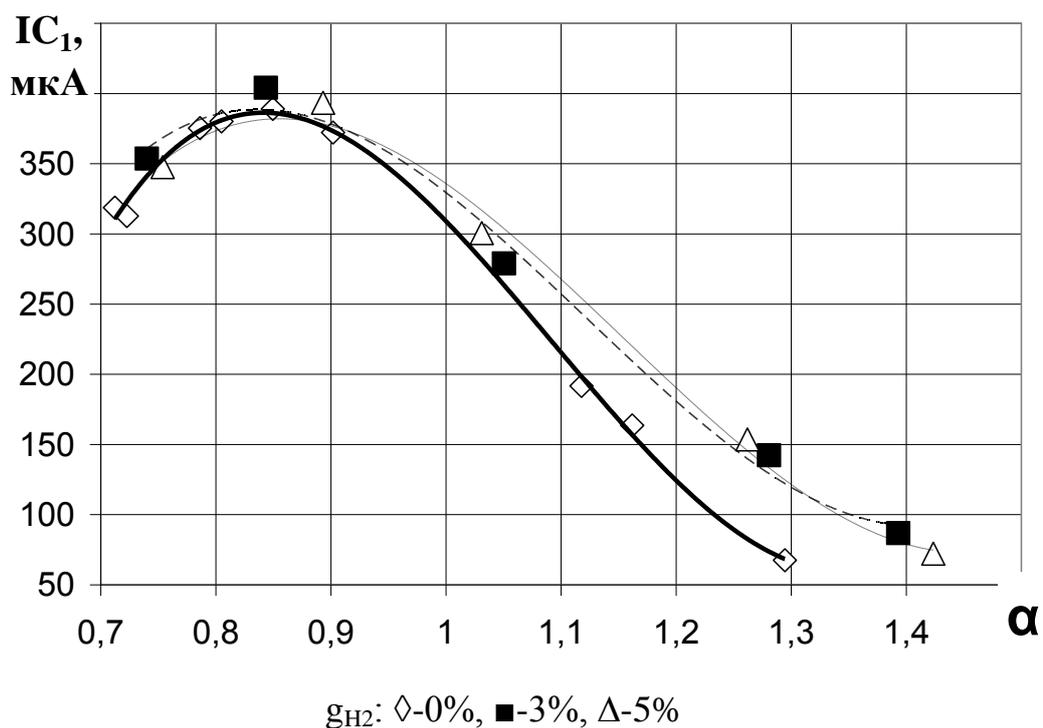


Рисунок 4.11 – Зависимость ионного тока на первом электроде датчика ионизации от состава бензоводородовоздушной смеси ($n=600 \text{ мин}^{-1}$):

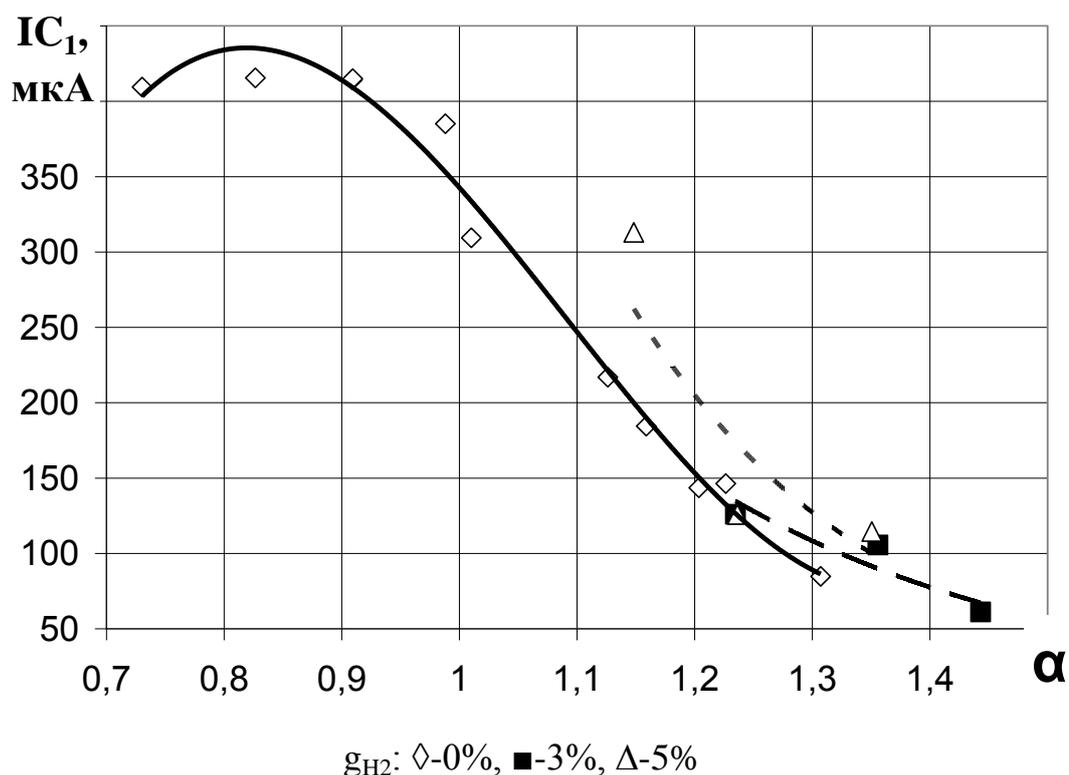


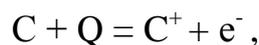
Рисунок 4.12 – Зависимость ионного тока на первом электроде датчика ионизации от состава бензоводородовоздушной смеси ($n=900 \text{ мин}^{-1}$):

Таким образом, характер изменения тока на ионизационном зонде, расположенного в удалённой от источника зажигания зоне камеры сгорания, отзывается на изменение физико-химических свойств бензоводородовоздушной смеси. Это позволяет использовать зондовый метод на основе явление электропроводности углеводородного пламени как инструмент для исследования процесса сгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы могут быть представлены следующими выводами:

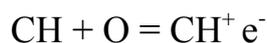
1. Весомый вклад в ионизацию пламени неоднородной смеси вносит эмиссия электронов с раскалённых частиц сажи, образующихся при пиролизе переобогащённой ТВС, по механизму



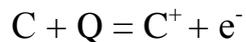
где Q – подведённое тепло для нагрева частицы сажи.

Таким образом при исследовании процесса горения неоднородной ТВС необходимо учитывать, что ионизация пламени определяется двумя механизмами:

- реакцией радикала CH с кислородом по схеме



- и термоэмиссией электронов с раскалённых частиц сажи



2. Выявлена взаимосвязь основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.

3. Определены возможности повышения эффективности и стабильности процесса сгорания на основе взаимосвязи основных характеристик сгорания с химической ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карно С. Размышление о движущей силе огня и о машинах, способных развить эту силу. 1824 – 43 с.
2. Kinbara T.A.O. 7-th Intern. Symposium on Combustion, Butterworths, London, 1939
3. Аршинов П.А., Мусин А.К. - ДАН СССР, 1958, № 3.
4. Милликен Р.К. Измерение температуры в объектах новой техники. - М.: Мир, 1965.
5. Твердохлебов В.И. - ДАН СССР, 1955, № 6.
6. Eindinder H.J., The Journal of Chem. Phys.,26,4, 1937
7. Shuler K.E. and Weber J. Journal of Chem.Phys.,22, N 3, 1934.
8. Sugden T.M. and Thrush B.A. Nature, (Lnd),v.I68, 1f 4273, 1951с.
9. Калькотт Г. - ВРТ, 1958, № 4.
- 10.Singer J.M., Grumer J. 7th Symposium (Int.) on Combustion, Lido, 1938 с.
- 11.Шайкин А.П., Жукова В.А. Техн.отчет № 001, 2286 КМЗ, 1972.
- 12.Fellous J. Journal des Recherches du Centre National de la Recherche Scientifique, N 4-8, 1958
- 13.Резник В.Е., Токарев В.В., Шайкин А.П. Ионизационный датчик.- А.с.№ 82855,;1974.
- 14.Шайкин А.П., Жукова В.А. Техн.отчет № 001,2877 КМЗ, 1974.
- 15.Yoshiyama S, Tomita E, Tabuchi N, et al. Combustion diagnostics of a spark ignition engine by using gasket ion sensor. JSAE paper 2003-01-1801, 2003.
- 16.Yoshiyama S, Tomita E, Tabuchi N, et al. Detection of flame propagation pattern in a spark ignition engine using gasket ion sensor. SAE paper 2004-01-1919, 2004.
- 17.Badawy T., Rai N., Singh J., et al. Effect of design and operating parameters on the ion current in a single- cylinder diesel engine. Int J Engine Research 2011; 12(6): 601-616.

18. Calcote H.F. Mechanisms for the formation of ions in flames. *Combust Flame* 1957; 1(4): 385-403.
19. Zheng S.Z., Zhang X. and She Z.Y. Study on cycle-by-cycle variations of ion current integral and pressure in spark ignition engine. In: International conference on electronic & mechanical engineering and information technology, 2011.
20. Zheng J.J., Huang Z.H., Wang J.H., et al. Effect of compression ratio on cycle-by-cycle variations in a natural gas direct injection engine. *Energy Fuels* 2009; 23(11): 5357-5366.
21. Zervas, E. Correlations between cycle-to-cycle variations and combustion parameters of a spark ignition engine. *App Thermal Eng* 2004; 24(14-15): 2073-2081.
22. Rodgers J.L., Nicewander W.A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *Am Stat* 1998; 42(1): 59-66.
23. Brogden, H.E. On the interpretation of the correlation coefficient as a measure of predictive efficiency. *J Educ Psychol* 1946; 37(2): 65-76.
24. Chatillon, G. The balloon rules for a rough estimate of the correlation coefficient. *Am Stat* 1984; 38(1): 58-60.
25. Marks, E. A note on the geometric interpretation of the correlation coefficient. *J Educ Stat* 1982; 7(3): 233-237.
26. Knop V., Michel J.B., Colin O. On the use of a tabulation approach to model auto-ignition during flame propagation in SI engines. *App Energy* 2011; 88(12): 4968-4979.
27. Gülder, O.L. Correlations of laminar combustion data for alternative SI engine fuels. SAE paper 841000; 1984.
28. Zhu G., Stuecken T., Schock H., Yang X., Hung D., Fedewa A. Combustion characteristics of a single-cylinder engine equipped with gasoline and ethanol dual-fuel systems. SAE paper 2008-01-1161; 2008.

29. Beeckmann J., Rohl O., Peters N. Numerical and experimental investigation of laminar burning velocities of iso-octane, ethanol and n-butanol. SAE paper 2009-01-2184; 2009.
30. Farrell J.T., Johnston R.J., Androulakis I.P. Molecular structure effects on laminar burning velocities at elevated temperature and pressure. SAE paper 2004-012936; 2004.
31. Vancoillie J., Verhelst S., Demuynck J. Laminar burning velocity correlations for methanol-air and ethanol-air mixtures valid at SI engine conditions. SAE paper 2011-01-0846; 2011.
32. Abraham J., Williams F.A., Bracco F.V. A discussion of turbulent flame structure in premixed charges. SAE paper 850345; 1985.
33. Peters N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion. In: 21st Symposium (international) on combustion; 1986. p. 1231-50.
34. Bradley. Combustion and the design of future engine fuels. Proc IMechE, Part C 2009;223:2751-65.