

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)  
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»  
(наименование кафедры)  
13.04.03 Энергетическое машиностроение  
(код и наименование направления подготовки)  
Энергетические установки транспортных систем  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Ионизация пламени в условиях ДВС с искровым зажиганием при  
использовании альтернативных топлив

Студент Кирилл Сергеевич Егоров (И.О. Фамилия) (личная подпись)

Научный руководитель Александр Петрович Шайкин (И.О. Фамилия) (личная подпись)

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Тольятти 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Обзор экспериментальных исследований ионизации пламени и исследуемая европейская установка.....	6
1.1 Исследование ионизации в стационарном пламени.....	6
1.1.1 Работы Вильсона и Нойеса.....	6
1.1.2 Работа Барнеса.....	10
1.1.3 Работа Беннетта.....	10
1.1.4 Работа Бельчера и Сагдена .....	14
1.1.5 Обобщение экспериментальных данных по исследованию явления химической ионизации пламени.....	15
1.2 Ионизация пламени в двигателях.....	16
1.2.1 Работа Мазона и Брауна .....	17
1.2.2 Работа Вейнгарта .....	18
1.2.3 Работы Вишневого.....	19
1.2.4 Работа Леведаля и Говарда.....	19
1.3 Влияние добавки водорода на ионизацию пламени бензинового двигателя в обедненных условиях.....	20
1.3.1 Работа Andrea и Varde. ....	20
1.4 Экспериментальная установка. Добавка водорода и процедура испытаний бензинового двигателя. ....	23
1.4.1 Экспериментальная установка .....	23
1.4.2. Экспериментальные процедуры .....	26
1.4.3 Результаты и обсуждение .....	27
Глава 2 Экспериментальное техническое оснащение и технологии выполнения и обработки результатов испытаний.....	33
2.1. Экспериментальное оборудование.....	33
2.2 Описание методики проведения эксперимента .....	36

2.3 Методика обработки результатов испытания.....	48
Глава 3 Обработка результатов экспериментов и их анализ.....	53
3.1 Зависимость ионного тока от величины прибавляемого в нее водорода, состава ТВС и скоростного режима двигателя.....	53
3.2 Средняя скорость распространения пламени в 1-ой и основной фазах сгорания и её взаимозависимость от состава топливовоздушной смеси, величины прибавляемого в нее водорода и скоростного режима двигателя.....	58
Глава 4 Обобщение результатов исследования.....	63
4.1 Изменение зависимости ионного тока в первой и главной фазах сгорания, при оборотах 600 и 900, при добавке водорода. ....	63
4.2 Изменение зависимости скорости распространения пламени в первой и главной фазах сгорания, при оборотах 600 и 900, при добавке водорода. ...	69
4.3 Зависимости плотности тока и скорости распространения пламени от массовой доли углерода в ТВС, при различных добавках водорода.....	78
Заключение.....	92
Список используемых источников.....	93
Приложение.....	102

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы.**

Ограниченные ресурсы ископаемого топлива и токсичные выбросы, исходящие из двигателей внутреннего сгорания, подтолкнули исследования сосредоточиться на альтернативных видах топлива. Из-за высокой температуры автонастройки водорода (приблизительно 858 К), лучше использовать водород на двигателях, а не на двигателях с воспламенением от сжатия.

Водород обладает множеством отличных свойств горения, которые могут быть использованы для улучшения характеристик горения и выбросов бензиновых двигателей зажигания. Две объемные доли водорода в общем потреблении 5% и 10% были применены для проверки влияния доли добавления водорода на сжигание двигателя. В связи с чем, исследование ведущих данных сгорания с хим ионизацией зон турбулентного горения в двигателях, считается важной задачей для проведения исследований.

Поскольку плотность энергии водорода по объему гораздо меньше, чем у бензина, водородные двигатели иногда имеют слабый крутящий момент. По сравнению с двигателями, использующими, свойства водорода и углеводородного топлива.

**Целью работы** является улучшение характеристик горения с хим. ионизацией и улучшение выбросов бензиновых двигателей зажигания.

**Результат поставленной цели гарантируется заключением последующих задач:**

1. выявить связь ведущих данных горения с химической ионизацией зоны турбулентного горения в ДВС
2. Добиться увеличения производительности и устойчивости процесса сгорания на базе связи ведущих данных сгорания с химионизацией зоны турбулентного горения в ДВС

**Объект исследования:** Поршневые ДВС

**Предмет исследования:** процесс ионизации в ДВС.

**Методы исследования.** Использовался способ опытного анализа, содержащий в себе стендовые эксперименты на УИТ-85, способы экспериментального рассмотрения и статистическое обрабатывание сведений.

Подлинность приобретенных результатов изучения определена огромным объемом исследований, использованием способов статистической обработки сведений.

#### **Научная новизна исследования**

Определена связь ключевых данных сгорания с хим ионизацией области турбулентного горения в ДВС.

#### **Практическая значимость работы:**

Выявленные способности увеличения производительности и устойчивости и устойчивости процесса сгорания на базе связи ключевых данных сгорания хим ионизацией зоны турбулентного горения в поршневых ДВС

#### **На защиту выносятся:**

1. Экспериментальные сведения, согласно воздействию данных распространения пламени на химическую ионизацию области турбулентного горения энергетических конструкций;
2. Обнаруженные на базе рассмотрения опытных изучений связи ключевых данных сгорания с химической ионизацией области турбулентного горения в энергетических конструкциях и поршневых ДВС.
3. Зависимость ионного тока на ИД, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли водорода в ТВС
4. Зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода
5. Зависимости плотности тока и скорости распространения пламени от массовой доли углерода в ТВС, при различных добавках водорода

### **Апробация работы.**

Ключевые утверждения диссертации докладывались и обсуждались в научно-промышленных семинарах кафедры «Энергетические автомобили и конструкции управления» ТГУ, а кроме того на конференции, в 2019 г. 2 студенческие конференции апрель 2018 и апрель 2019 и 2-е международные

**Публикации.** По этой теме опубликовано 2 статьи, получены международные сертификаты.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 105 страницах машинописного текста, 2 приложения, 1 таблица и 64 рисунка.

## **ГЛАВА 1 Обзор экспериментальных исследований ионизации пламени и исследуемая европейская установка**

### **1.1 Исследование ионизации в стационарном пламени**

Изучение ионизации в пламенах ставило своей задачей проверку теории Саха и использование ее для определения потенциалов ионизации ряда элементов. Поэтому, соответствующие работы сводились к опытному измерению электропроводности и к расчету или к экспериментальному определению температуры пламени горелки. Ниже приводятся основные результаты фундаментальных работ в этом направлении.

#### **1.1.1. Работы Вильсона и Нойеса**

Как показали первые же наблюдения, проводимость пламени чистых газов значительно меньше, чем пламени, содержащих даже не большие количества щелочных металлов.

С другой стороны, для щелочных металлов имелись надежные определения потенциалов ионизации из спектроскопических данных, в то время как для чистого пламени неизвестен точно даже состав продуктов сгорания.

Поэтому большая часть исследований, имевших целью проверку соответствия проводимости пламени с уравнением Саха, заключалась в измерении проводимости пламени, содержащих соли щелочных металлов. Методика таких измерений была обоснована и разработана в серии работ Вильсона.

В этих работах применялась горелка, изображенная на рис. 1.1 представляющая видоизменение многосопельной горелки типа Мекера, Электропроводность измерялась здесь между квадратными платиновыми электродами размером 1.5\*1.5 см, помещенным в пламенных газах на более или менее значительном расстоянии от конусов пламени, т.е. от собственной зоны реакции.

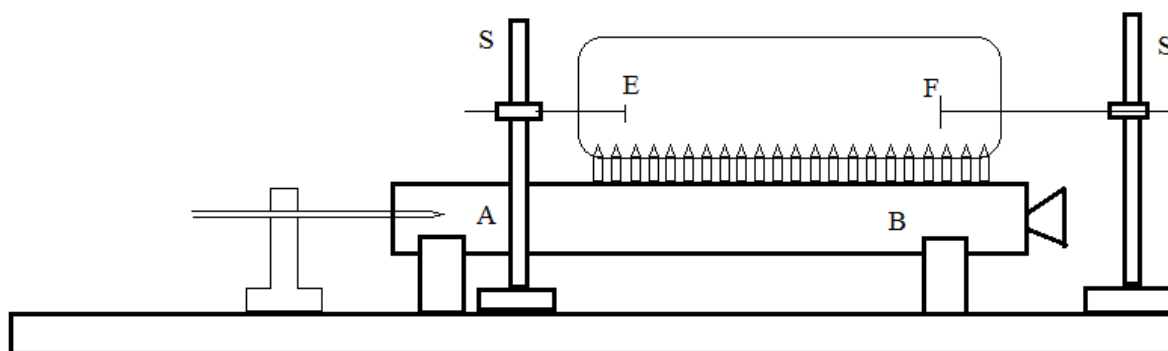


Рисунок 1.1. – Методика измерения электропроводности пламени в опытах Вильсона А, В – многосопельная горелка; Е, F – электроды; S – подвижные подставки

Зависимость измеренной электропроводности «G» от концентрации соли щелочных металлов, выражается эмпирическим уравнением вида, где а и b константы.

$$C = \frac{G_2^2 - 1}{10^4 * G} (b + aG) \quad (1.1)$$

Такой же вид уравнения авторы получили, рассматривая ионизацию атомов щелочного металла и продуктов сгорания, как равновесные реакции между ионами, электронами и нейтральными атомами в соответствии с термодинамической теорией. Действительно, если  $K$  и  $K_F$  – константы ионизационного равновесия соответственно для щелочного металла и продуктов сгорания, то

$$K = \frac{P_M^+ * P_e}{P_M} \quad (1.2)$$

$$K_F = \frac{P_F^+ * P_e}{P_F} \quad (1.3)$$

соответственно  $P_e, P_M, P_M^+, P_F^+, P_F$  парциальные давления электронов, положительных ионов и нейтральных атомов щелочного металла, положительных ионов и нейтральных атомов продуктов сгорания.

Далее, полагая, что проводимость в пламенах определяется только электронами ввиду их значительно большей подвижности по сравнению с ионами и учитывая, что парциальное давление электронов равно сумме парциальных давлений ионов, получаем

$$AG = P_e = P_M^+ + P_F^+ \quad (1.4)$$

Так как общее парциальное давление металлических паров (ионизированных и нейтральных) пропорционально концентрации соли в пламени, т.е.

$$BC = P_M^+ + P_F^+ \quad (1.5)$$

Комбинируя уравнения 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 имеем

$$AG = \frac{KBC}{AG + K} - \frac{K_F P_F}{AG} \quad (1.6)$$

Принимая проводимость пламени без соли  $G=1$  (когда  $C=0$ ) из ур-ия (1.7) получаем

$$K_F * P_F = A^2 \quad (1.7)$$



и решая ур-ие 1.7 относительно «С» находим

$$C = \frac{G^2 - 1}{G} * \left( \frac{A}{B} + \frac{A^2 G}{KB} \right) \quad (1.8)$$

Из сопоставления ур-ия (1.9) с ур-ем (1.2) видно, что они идентичны, если положить, что

$$\frac{A}{B} = \frac{b}{10^4} \quad (1.9)$$

$$\frac{A^2}{KB} = \frac{a}{10^4} \quad (1.10)$$

Из уравнений 1.9 и 1.10 находится константа ионизации щелочных металлов

$$K = A \frac{b}{a} = \frac{P_e}{G} * \frac{b}{a} \quad (1.11)$$

На основании ур-ия (1.11) авторы вычисляют потенциалы ионизации пяти щелочных металлов по известному значению потенциала ионизации одного из них и по отношению констант ионизационного равновесия для двух щелочных металлов при постоянной температуре, пользуясь для этого несколько преобразованным уравнением Саха

$$\log \frac{K_2}{K_1} = \frac{5048(V_1 - V_2)}{T_1} \quad (1.12)$$

Приняв, например, потенциал ионизации для натрия  $V=5.111$  эл.-в. и температуру  $T=2000^\circ\text{K}$ , авторы получили следующий ряд значений потенциалов ионизации для различных металлов:

Таблица 1.1

Элемент	Отношение b/a	Потенциал ионизации	
		вычисленный	наблюд. спектроскопичес.
Цезий	10	4.0	3.837
Рубидий	2.25	4.26	4.154
Поташ	1.38	4.35	4.317
Литий	0.0023	5.46	5.362

Хотя авторы считают, что эти результаты дают поразительное подтверждение общей обоснованности вычисления ионизации элементов от их потенциалов ионизации по уравнению Саха, необходимо учесть, что при расчете принята совершенно произвольная, необоснованная никакими измерениями температура пламени паров газолина с воздухом.

Достаточно, предположить, что при этом допущена ошибка в 100-200°, чтобы получить уже значительно худшие совпадения потенциалов ионизации.

### **1.1.2 Работа Барнеса**

В этой работе проверка уравнения Саха проводилась на основе сопоставления экспериментально измеренной температуры газовой горелки методом обращения линии натрия с температурой, вычисленной с помощью уравнений Саха по электропроводности пламени с солью Цезия по принятому значению потенциала ионизации для последнего. Автор получил совпадение вычисленной по уравнению Саха и измеренной температуры с точностью до 1.5%. Степень достоверности этого совпадения наглядно проявляется в рассматриваемой ниже работе, в которой точно воспроизведена вся методика Барнеса, в том числе и метод измерения температур пламени.

### **1.1.3 Работа Беннетта**

Как мы уже отмечали здесь была точно воспроизведена методика Барнеса оценки температур пламени, измерения его электропроводности, причем опыты были проведены с пламенем светильного газа.

В отличие от опытов Барнеса измерения в этом случае производились не при постоянной температуре, а в условиях изменяющихся температур пламени с помощью разбавления светильного газа различными концентрациями  $\text{CO}_2$ . Как видно из приведенной на рис. 1.2, схемы, эти измерения прово-

дидлись также в пламени много сопельной горелки на некотором расстоянии от конусов пламени, т. е. от зоны реакции. По этому поводу автор не дает определенных указаний, лишь отмечая что электроды помещались в наиболее горячую часть пламени непосредственно над конусами.

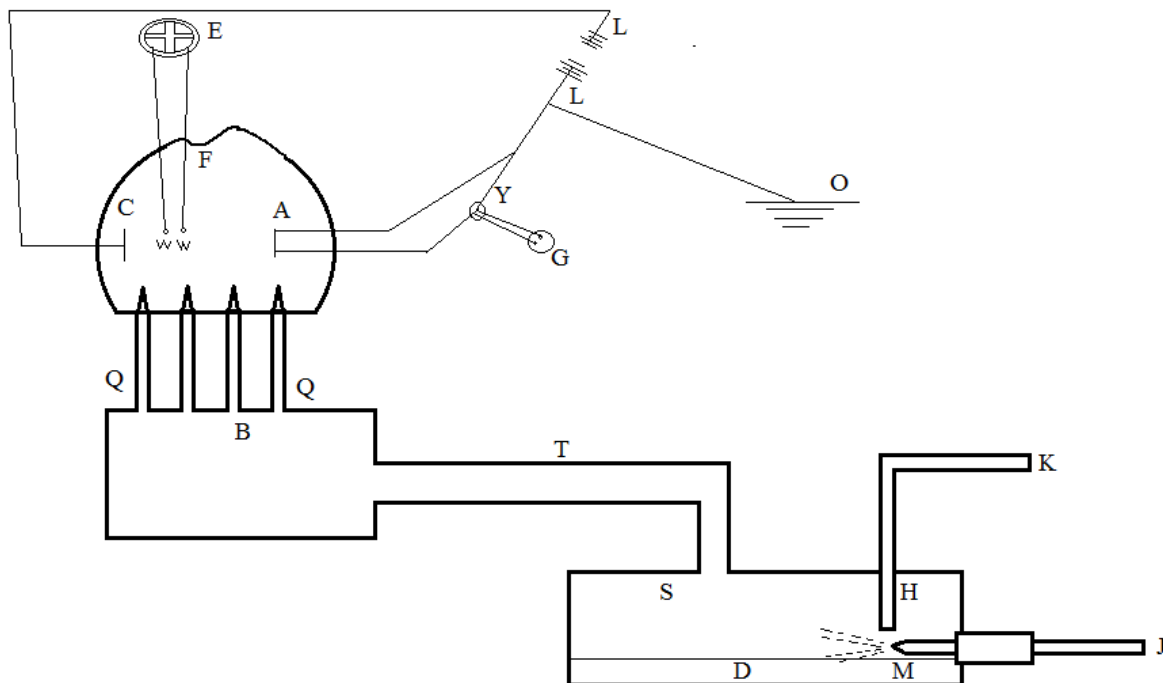


Рисунок 1.2 – Методика измерения электропроводности пламени в опытах Беннетта. В – четырехсопельная горелка; А, С – электроды; Е- квадрант, электрометр; G – гальванометр; L – батарея; D – раствор щелочного металла; М – пульверизатор; К – трубка для подвода светильного газа; J – трубка для подвода воздуха

Рассмотрим вначале серию опытов с пламени чистого газа, для которого были проведены измерения электропроводности в диапазоне температур пламени 1570-1920°K. Для каждой температуры по предположению справедливо уравнение Саха:

$$\log K = -\frac{5048V}{T} + 2.5\log T - 6.5 \quad (1.13)$$

Отсюда получается отношение констант равновесия для двух температур пламени без соли

$$\log \frac{K_{o2}}{K_{o1}} = 5048V_o \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) + 2.5\log \frac{T_2}{T_1} \quad (1.14)$$

Константа равновесия

$$K_0 = \frac{P_0^- P_0^+}{P_0} = \frac{(P_0^-)^2}{P_0} \quad (1.15)$$

Так как  $P_0^- = A\delta_0$ , где  $\delta_0$  – проводимость, А- константа, обратно-пропорциональная скорости электронов, то  $K_0 \sim \delta_0^2$

$$2\log \frac{\delta_{o2}}{\delta_{o1}} = 5048V_o \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) + 2.5\log \frac{T_2}{T_1} \quad (1.16)$$

из которого может быть определен потенциал ионизации продуктов горения по измеренным значениям электропроводности пламени для каких-либо двух измеренных температур.

На основе такого рода расчетов автор приводит значение для ионизационного потенциала свободного от солей пламени  $V_o=1.8$  электрон-вольта, при этом автор никак не отмечает абсолютное несоответствие этого потенциала ионизации всеми известными значениями потенциалов ионизации для возможных продуктов сгорания и составляющих, как уже отмечалось. Собственно, проверку уравнения Саха автор пытается провести на электропроводности пламени содержащего пары щелочных металлов цезия и рубидия.

Проведя для них измерение электропроводности в тех же пределах температур 1570-1920°К, автор по значениям электропроводности определил соответствующие константы равновесия, а по принятому значению потенци-

ала ионизации (для рубидия  $V=4.154$  эл.в.) вычислил их из уравнения Саха. По утверждению автора для высоких температур пламени (выше  $1720^\circ\text{K}$ ), получается хорошее совпадение определенных, из электропроводности и вычисленных из уравнения Саха констант ионизации. При этом автор снова не обращает внимания на то совершенно невероятное, именно с точки зрения термодинамической теории, обстоятельство, что константы ионизации, вычисленные им для чистого пламени оказались, по крайней мере  $10^5$  раз превышающими константами ионизации для пламени с добавкой цезия или рубидия.

Наконец, отметим еще одно обстоятельство, подвергающее сомнению выводы этой работы.

Нами был произведен расчет потенциала ионизации для пламени, содержащих пары цезия и рубидия по данным автора, используя изменение электропроводности этих пламени с температурой, т.е. по ур-ю. При этом были получены значения потенциала ионизации для цезия.  $V=1.28 - 1.94$  эл.в. в пределах изменения концентрации его в растворе с дистиллированной водой от  $0.31 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$  моль/литр и для рубидия  $V=2.08 - 2.76$  эл. в. т.е. значительно ниже спектроскопических значений и почти совпадающих с потенциалом ионизации, полученным Беннетом для чистого пламени. С точки зрения теории термической ионизации, единственно возможным объяснением такого резкого несовпадения вычисленных таким образом потенциалов ионизации с реальными их значениями может быть только ошибка в оценке температур пламени.

Отметим что максимальная температура пламени для светильного газа по современным данным составляет  $2200^\circ\text{K}$  вместо  $1920^\circ\text{K}$ , замеренных Беннетом. Можно предполагать, что и минимальная температура значительно превышала ту температуру. Таким образом и работы Барнеса и Беннета не могут служить основой для подтверждения теории Саха применительно к ионизации пламени ввиду крайней недостоверности используемых здесь данных по температурам пламени.

### 1.1.4 Работа Бельчера и Сагдена

В этой работе электрические свойства пламени определялись новым методом- по затуханию коротких 3-х см радиоволн, при этом непосредственно определяется концентрация электронов пламени

$$n = 2,6 * 10^{11} \beta \quad (1.17)$$

где  $\beta$  коэф. Затухания в децибеллах на 1см толщины слоя пламени.

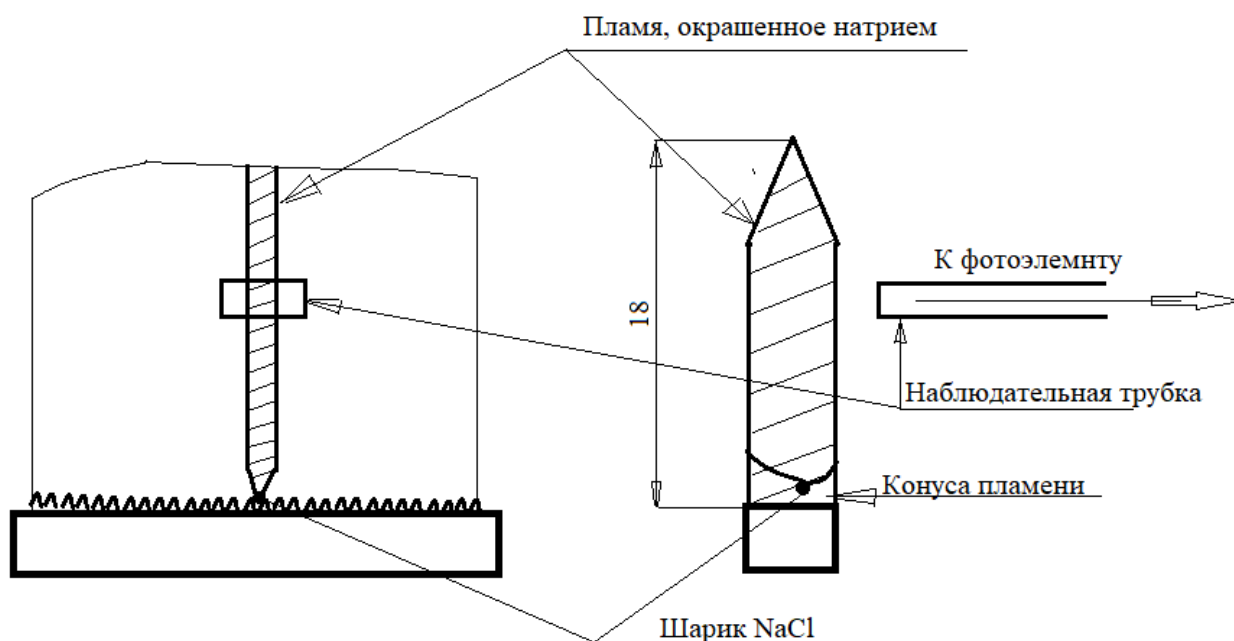


Рисунок 1.3 – Схема измерения электропроводности пламени в опытах Бельчера и Сагдена

Как видно из рис.1.3 измерения производились в зоне пламени, далеко отстоящей от зоны реакции – конусов пламени светильного газа мекеровской горелки. Степень затухания радиоволн и концентрации электронов определялись в присутствии солей металлов  $N_a$  и  $K_a$  при различных температурах пламени, замеряемых методом обращения линии натрия. Максимальная температура пламени по этим измерениям составляет  $2200^{\circ}K$  т.е. на  $200^{\circ}K$  выше той, которая фигурировала в работах Барнеса и Беннетта. Изменение  $\log E$  (парц. давление элек.) с обратной температурой  $\frac{1}{T}$  дает в пределах температур

пламени 2000-2200°K прямые линии, наклон которых определяет потенциал ионизации.

Получение таким образом значения потенциалов ионизации для калия  $V_u = 4.00 \pm 0.2$  эл. в. близки к спектроскопическому значению  $V_u = 4.32$  эл. в. что может служить удовлетворительным подтверждением уравнения Саха в данном случае.

Некоторые заметные отклонения от теоритических значений потенциалов ионизации наблюдается при применении галоидных солей металла и особенно при добавке избыточных количеств галоид-содержащих соединений.

### **1.1.5 Обобщение экспериментальных данных по исследованию явления химической ионизации пламени**

Химическая ионизация в области горения углеводородного топлива найдена на основании результатов основных изучений, показанных ранее, детально освещённых в [1-5].

В соответствии с итогами данных анализов выявлены в зоне горения последующие ионы:  $\text{CH}_3^+$ ,  $\text{CHO}^+$ ,  $\text{C}_3\text{H}_3^+$  и  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Концентрация иона  $\text{CH}_3^+$  является менее 0,001 концентрации ионов  $\text{CHO}^+$  и  $\text{C}_3\text{H}_3^+$ . Частица  $\text{H}_3\text{O}^+$  при протекании хим. взаимодействий горения образовывается позднее других

Основными ионами, характеризующими формирование других ионов, считаются ионы  $\text{CHO}^+$  и  $\text{C}_3\text{H}_3^+$ . Ионизация в области горения обусловливается соответствующими реакциями:



При содействии данных ионов с электроном выходит атом водорода и молекула воды:



Реакция (1.21) протекает очень быстро, следовательно, уровень химическая ионизация пламени при прочих равных условиях определяется концентрацией углерода в ТВС.

## 1.2 Ионизация пламени в двигателях

Ввиду трудности непосредственного наблюдения пламени в цилиндре двигателя приобрели свое распространение косвенные методы регистрации, основанные на фиксации появления пламени в данном месте камеры сгорания с помощью ионизационных датчиков.

Мы оставляем вне рассмотрения многочисленные работы этого типа, наиболее подобными из которых являются работы Шнауффера и Рабецена, Иноземцева. Нас будут интересовать, те исследования, в которых изменение электропроводности пламени служит для характеристики самого пламени в условиях горения двигателя.

Одной из первых работ такого типа является исследование Абугова и Соколика(1), в которых установлено определенное значение электропроводности пламени во времени при переходе от нормального горения к детонационному – резкое возрастание величины ионизационного тока и увеличение скорости его нарастания.

Это специфическое различие ионизации пламени при детонационном сгорании и нормальном явилось отравным пунктом для многих ионизационных исследований, имевших целью использование ионизации, как одного из способов обнаружения детонации в двигателе. В рассмотренной работе представляет также интерес наблюдение, показывающее изменение ионизационного тока со степенью сжатия двигателя, состава смеси, различное действие на величину ионизационного тока антидетонаторов и продетонаторов и т. д.



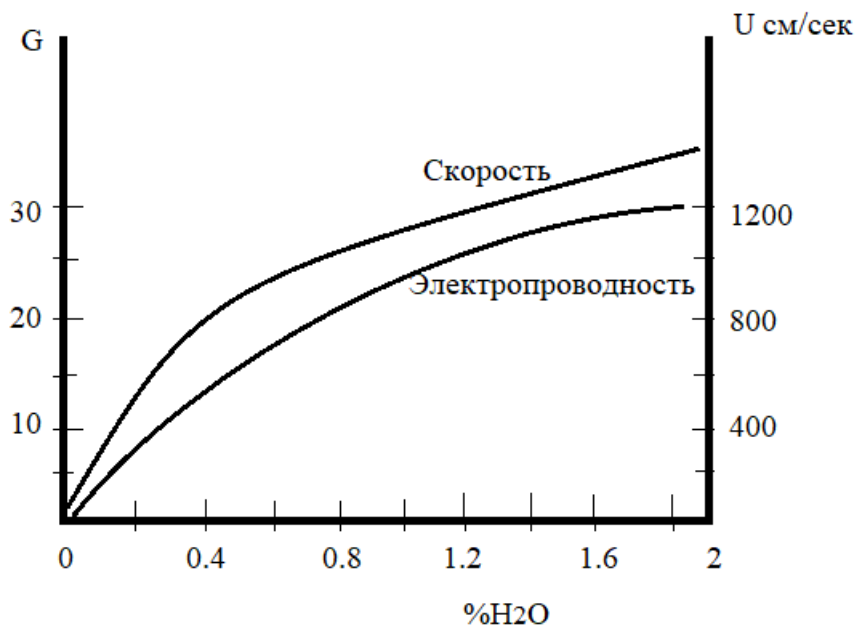


Рисунок 1.4 – Влияние скорости пламени на электропроводность данные Гарнера и Джонса.

### 1.2.1 Работа Мазона и Брауна

Основной целью этой работы было исследование особенностей детонационного сгорания с помощью регистраций ионизационного тока.

Наиболее типичные осциллограммы детонирующего двигателя приведены на рисунке 1.5. Здесь наряду с индикаторными диаграммами приведены две осциллограммы тока для двух ионизационных датчиков: №1 расположенного в начальной зоне горения и №2 помещенного вблизи последней части заряда. В детонирующем двигателе на осциллограмме всегда появляется вторичный пик ионизационного тока «b», причём начало вторичного подъема тока имеет место за несколько градусов поворота коленчатого вала, (например, за 4°) до момента детонационного скачка давления. Вторичный пик указывает на то, что в полностью или частично сгоревших газах, расположенных в зоне искры за распространяющимся фронтом пламени, имеет

место возобновление до детонационного скачка давления.

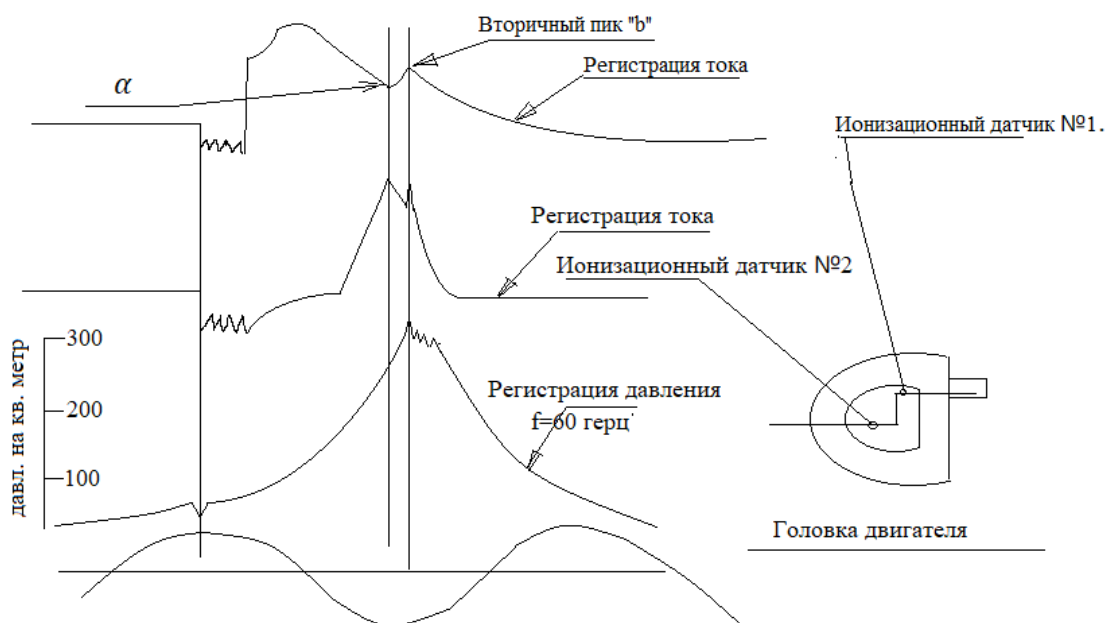


Рисунок 1.5 Регистрация ионизационного тока при детонации в двигателе (Казон, Браун)

### 1.2.2 Работа Вейнгарта

Здесь была сделана попытка установить специфические отличия детонационного сгорания в двигателе от детонационной волны в трубах на основании сопоставления осциллограмм ионизационного тока в обоих случаях.

В работе приведены осциллограммы тока, при детонации в трубе смеси бензола с кислородом и стуке в двигателе. В отличие от детонации в трубе, в двигателе ионизационный датчик расположенный в последней части заряда при ее самовоспламенении. Здесь нас интересует только то, что заметное повышение ионизационного тока регистрируется в последней части заряда еще до появления нем настоящего пламени, что заставляет предположить чисто химическое происхождение ионизации.

### 1.2.3 Работы Вишневого

Основная цель этих работ- использование ионизационного метода для обнаружения в двигателе детонации, основываясь на специфической форме осциллограмм ионизационного тока при стуке в двигателе.

Как видно из рисунка 1.6, ионизационный датчик, помещенный вблизи свечи в случае детонации регистрирует вторичный подъем тока, тем более значительный, чем интенсивнее детонация. Это наблюдение полностью совпадает с вышеприведенными данными Мазона и Брауна.

Никаких количественных измерений на основании которых можно было бы судить в соответствии ионизационного тока температуре газа в этих работах не содержится.

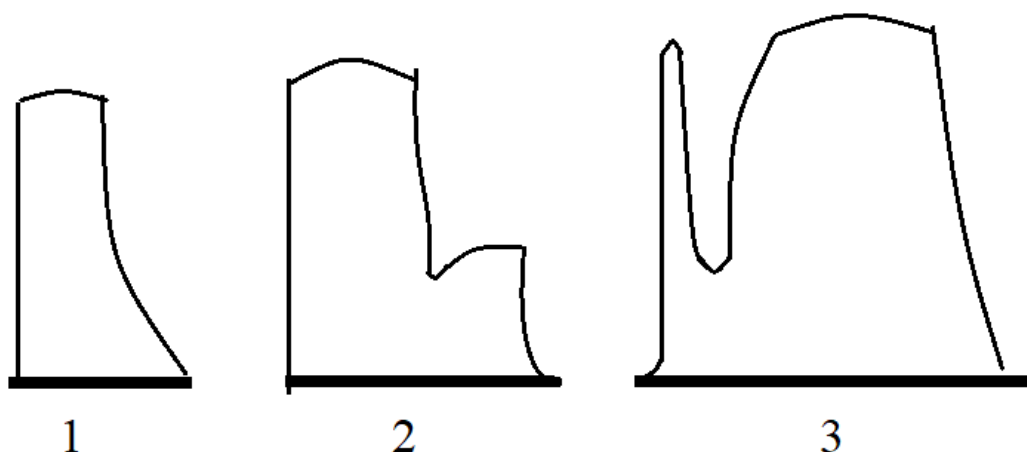


Рисунок 1.6 Регистрация ионизационного тока в двигателе (опыты Вишневого)

1. Нормальный режим работы двигателя
2. Режим слабой детонации
3. Режим сильной детонации

### 1.2.4 Работа Леводаля и Говарда

В этой работе исследовалось двустадийное самовоспламенение воздушных смесей гексана и гептана различного состава, причем одновременно

с индикаторными диаграммами были записаны и осциллограммы ионизационного тока. При этом по утверждению авторов заметная ионизация регистрируется лишь в момент появления пламени и не наблюдается в период, предшествующий горячему пламени т. е. в холодно-пламенной стадии.

На рисунке 1.7 приведено изменение максимальной величины ионизационного тока в зависимости от состава смеси. Максимум ионизационного тока соответствует составу смеси  $\alpha=0.85$ , т. е. примерно соответствует максимальной температуре сгорания.

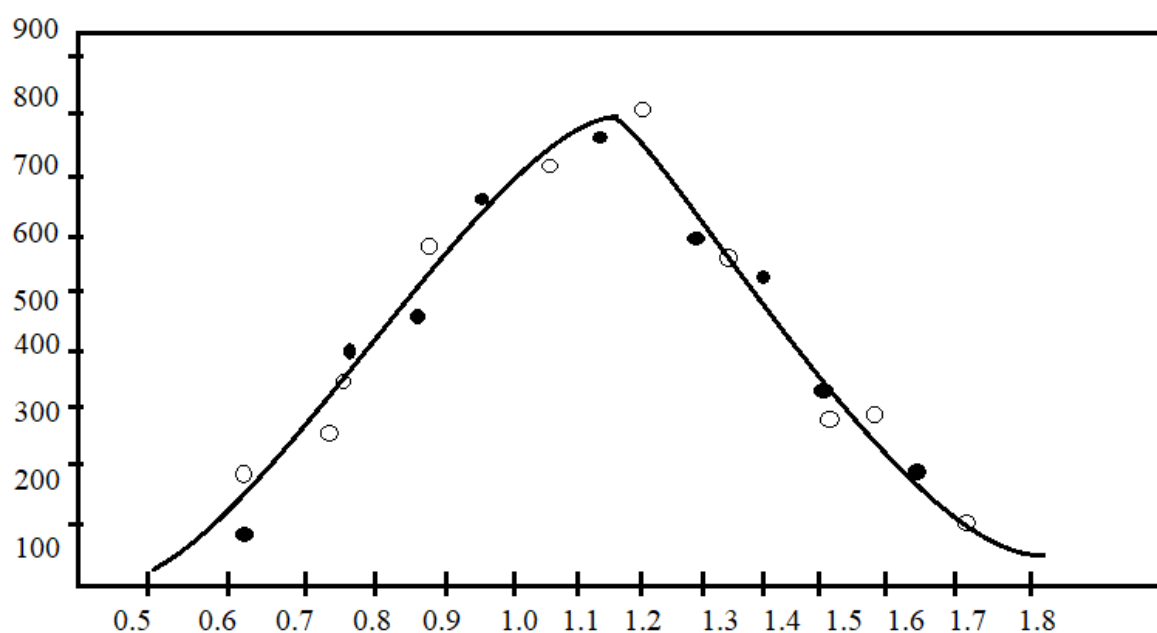


Рисунок 1.7 – Зависимость ионизации в пламени от состава смеси при самовоспламенении в двигателе; ○ -  $n=600$  об/мин, температура на всасывании  $T=220$  °F; ● -  $n=900$  об/мин  $T=220$  °F.

### 1.3 Влияние добавки водорода на ионизацию пламени бензинового двигателя в обедненных условиях

#### 1.3.1 Работа Andrea и Varde.

Ограниченные ресурсы ископаемого топлива и токсичные выбросы, исходящие из двигателей внутреннего сгорания, подтолкнули исследования

сосредоточиться на альтернативных видах топлива. В предыдущих исследованиях водород оказался альтернативным топливом, которое может применяться на транспортных средствах. Из-за высокой температуры автонастройки водорода (приблизительно 858 К), лучше использовать водород на двигателях, а не на двигателях с воспламенением от сжатия. Водород обладает многими уникальными свойствами горения, которые приносят пользу эффективности двигателя и производительности выбросов. Диффузия коэффициента водорода (0,61 см<sup>2</sup>/с) примерно в четыре раза больше, чем у бензина (0,16 см<sup>2</sup>/с), что улучшает процесс смешивания топлива и воздуха, а также способствует повышению однородности горючей смеси. Адиабатическая скорость пламени водорода (237 см/с) в пять раз больше, чем у бензина (42 см/с), что может способствовать повышению стабильности работы двигателя. Между тем высокая адиабатическая скорость пламени водорода указывает на то, что сжигание водорода двигателями гораздо ближе к идеальному постоянному объему горения, что выгодно для более высокой тепловой эффективности. Однако из-за высокой адиабатической температуры пламени водорода чистый двигатель с водородным топливом всегда испытывает низкую эмиссионную эффективность NO<sub>x</sub>, которая обеспечивает широкую коммерциализацию. Поскольку плотность энергии водорода по объему гораздо меньше, чем у бензина, водородные двигатели иногда имеют слабый крутящий момент.

Андреа и Варде исследовали влияние различных оборотов двигателя и коэффициентов эквивалентности на сжигание гидрогенерированного бензинового двигателя. Который был предварительно смешан в конкретном баке перед входом в цилиндр. Результаты эксперимента показали, что продолжительность горения уменьшается с увеличением доли смешивания водорода.

Циклическое изменение было также ослаблено добавлением водорода. Они, для двигателя, работающего на водородно-бензиновой смеси, проверили его на модифицированный карбюратор бензинового двигателя. Из эксперимента он обнаружил, что выбросы NO<sub>x</sub>, HC и CO обогащенные водородом

бензинового двигателя были ниже первоначального. Варде провел эксперимент на одноцилиндровом карбюраторном двигателе, исследовав влияние добавки водорода на улучшение устойчивости двигателя, операционной стабильности.

Он доказал, что выбросы парниковых газов могут быть эффективно снижены за счет добавления водорода, независимо от того, добывается водород путем газового реформирования или электролиза. Джи и Ван исследовали влияние добавления водорода на работу бензинового двигателя на холостом ходу в стехиометрических условиях.

Результаты испытаний показали, что мощность двигателя уменьшается с увеличением добавок доли водорода. Двигатель показал тепловую эффективность и показатель выбросов был также улучшен после обогащения водорода, за исключением того, что выбросы HC и CO были немного увеличены, когда объемная доля водорода во впуске превысила 4,88%.

Однако ограниченные исследования были связаны с обогащенными водородо-бензиновыми двигателями, и многие исследователи в карбюраторных двигателях и инжекторных по-прежнему использовали водород или предварительно смешанные воздушно-водородные смеси во впускных коллекторах. Но такой способ усилил возможность обратного огня во впускных коллекторах за счет широкой воспламеняемости и низкой энергии воспламенения водорода.

Таким образом, количественное влияние добавок водорода на современные бензиновые двигатели с электронным управлением внутреннего сгорания и выбросов в бедных условиях еще предстоит изучить в деталях.

## **1.4 Экспериментальная установка. Добавка водорода и процедура испытаний бензинового двигателя.**

### **1.4.1 Экспериментальная установка**

Бензиновый двигатель производства «Beijing Hyundai Motors» 1.6 L, порт впрыска топлива, четырехцилиндровый, был использован в этом эксперименте.

Впускной коллектор двигателя был изменен и использовался в данном исследовании (см. рис. 1.9), с четырьмя форсунками водорода, установленные у впускного клапана каждого цилиндра, при этом сохраняя оригинальность системы впрыска бензина, так что впрыснутый водород может быть введен в цилиндры быстрее, фактически, в ходе эксперимента не было обнаружено обратного огня даже тогда, когда объемная доля водорода во впуске 6%, превышала его предел горения (4,1%).

Используемый в исследовании водород был получен путем электролиза, и он хранился в контейнере, который может вместить 16 цилиндров водорода при давлении 16 МПа вне лаборатории двигателя. Водород высокого давления может быть введен в водородную часть впускных коллекторов на 0,3 МПа через две ступени снижения давления. Для регулирования времени искры, времени впрыска и длительности использования водорода и бензина был принят самостоятельный электронный блок управления (СЭБУ). В СЭБУ двигатель получает, данные датчика от двигателя от оригинального ЭБУ через кабели и имеет связь с калибровками компьютера, то есть длительности впрыска, водорода и бензина можно отрегулировать командами с калибровки компьютера для достижения указанной объемной доли водорода и избытка воздуха соотношения бензин–водород во впускной трубе.

На рисунке 1.10 показана схема экспериментальной системы. Динамометр вихревого тока GW160 был соединен с двигателем для управления и измерения частоты вращения двигателя и крутящего момента (погрешности измерения частоты вращения двигателя и крутящего момента являются 1

об/мин и 0.4 Нм, соответственно). Данные давления в цилиндре были обнаружены Кистлером 6117BFD17- датчик давления свечи зажигания (точность измерения 0.6% Ф. С.), который был ввинчен в четвертый цилиндр испытания двигателя для получения давления в цилиндре сгорания и обеспечивающий зажигание. К передней части коленчатого вала двигателя был подключен оптический энкодер Kistler 2613B, производящий 1800 импульсов на вращение для запуска системы сбора давления (разрешение угла коленчатого вала 0.2 А, отклонение измерения <0.01 А). Датчик давления в цилиндре и оптический энкодер были соединены с анализатором сгорания «DEWETRON», выполненным в Австрии по экранированным кабелям.



Рисунок 1.9 -Бензиновые и водородные, топливные рампы и форсунки, установленные на впускных коллекторах.

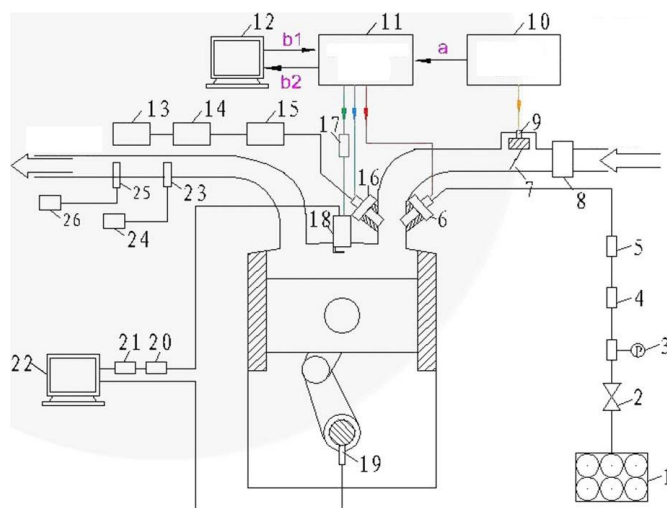




Рисунок. 1.10 – Схема экспериментальной системы. 1. Контейнер цилиндра водорода 2. Регулирующий клапан давления водорода 3. Измеритель давления водорода 4. Расходомер водорода массовый 5. Разрядник 6. Инжектор водорода 7. Дроссель 8. Расходомер массы воздуха 9. Задвижка 10. Первоначально ЭСУ (ОЭСУ) 11. Разработано ЭСУ (ОЭСУ) 12. Калибровки компьютера 13. Топливный бак 14. Расходомер массы топлива 15. Топливный насос 16. Топливная форсунка 17. Модуль зажигания 18. Датчик давления с свечей зажигания 19. Оптический энкодер 20. Усилитель заряда 21. Аналого-цифровой преобразователь 22. Анализатор сгорания 23. Датчик O<sub>2</sub> 24. А / F анализатор 25. Выбросы пробоотборника 26. МЕХА-7100 анализатор выбросов.

Давление цилиндра и угла поворота коленчатого вала с сигналом более чем 300 последовательных циклов был отобран и обработан с помощью «ДЕВЕКА» сжигания (анализ программного обеспечения), встроенного в «ДЕВЕТРОН» сгорания для получения анализа: давления в цилиндре от угла поворота коленчатого вала, скорости тепловыделения от угла поворота коленчатого вала, массовой сгоревшей доли от угла поворота коленчатого вала и т. д.

Выбросы выхлопных газов NO<sub>x</sub>, HC, CO и CO<sub>2</sub> из испытательного двигателя измерялись с помощью анализатора выбросов Хориба МЕХА-7100 DEGR. Неопределенности измерений NO<sub>x</sub>, HC, CO и CO<sub>2</sub> составляют, менее 1% от измеряемых значений. Измерение чувствительности выбросов NO<sub>x</sub>, HC, CO и CO<sub>2</sub> составляет 1 промилле, 1 промилле, 1 промилле и 0,01% соответственно. Скорость потока воздушной массы контролируется в «TMP-800» - тепловой массовый расходомер (погрешность измерения 1% Ф. С.).

Для заданного расхода водорода, продолжительность впрыска бензина может быть скорректирована, чтобы получить различные коэффициенты избыточного воздуха.

Коэффициент избытка воздуха также контролирует Хориба МЕХА-110 А/Ф анализатор с датчиком O<sub>2</sub> вставлен в выхлопную трубу. Установка мо-

лярного отношения атомов Н/С прибора может быть отрегулирована измеренными расходами бензина и водорода, так что он может хорошо измерить соотношение А/Ф обогащенного водородом двигателя. Расчетные и измеренные коэффициенты избыточного воздуха показали хорошую согласованность в ходе эксперимента.

#### **1.4.2. Экспериментальные процедуры**

Проводилась проверка при частоте вращения двигателя 1400 об/мин и при абсолютном давлении в коллекторе составил 61,5 кПа, что может являться одним из типичных условий эксплуатации для езды по городу. Длительность впрыска водорода корректировалась в соответствии с расходом впускного воздуха для изменения объемной доли водорода в общем объеме впускного газа от 0% до 3% и 6% соответственно. Для данной объемной доли водорода скорость потока бензина была постепенно снижена, чтобы заставить двигатель работать в бедных условиях с большими коэффициентами избыточного воздуха. Как известно, в момент зажигания оказывает большое влияние на работу двигателя СИ. Однако этот документ является лишь целью изучения влияния добавок водорода на СИ производительности двигателя, при этом свечи находятся под углом загородных и городских условий вождения, поэтому зажигание держится в 22 град от НМТ эталонного двигателя для всех условий тестирования при 1400 об/мин и давления 61.5 кПа. Такая фиксированная стратегия регулирования времени зажигания была также принята другими исследователями для изучения производительности обогащенных водородом двигателей.

Кроме того, поскольку экономичный режим нуждается в расширенном времени искры и добавление водорода требует замедленного времени искры, сбалансированное время искры должно быть вокруг одного из эталонных двигателей

В «DEWESA» программное обеспечение, для анализа сгорания, было использовано в данном исследовании для записи давления в цилиндре двигателя данные и расчеты, процент коэффициента среднего эффективного давления в течение 300 циклов подряд.

Проведен анализ параметров горения и выбросов двигателя для различных уровней добавления водорода и коэффициентов избыточного воздуха. В ходе эксперимента, охлаждающей жидкости и смазки, масло хранилось при 90С и 95С соответственно, чтобы уменьшить его отрицательное воздействие на результаты испытания.

### **1.4.3 Результаты и обсуждение**

Среднее эффективное давление (СЭД) - это параметр, который отражает выходную мощность двигателя. Рисунок 1.3 отображает линии.

Это видно из рис.1.11, что СЭД уменьшается с увеличением доли добавления водорода, когда двигатель работает в стехиометрических условиях. Это также показано на рис. 1. 3 что СЭД уменьшается с 420 кПа до 407 кПа при 3% добавки доли водорода и от 420 кПа до 392 кПа при 6% водорода, помимо доли, когда состав 1.00. Тем не менее, когда топливно-воздушная смесь постепенно преобразуется, добавка водорода способствует в улучшении СЭД двигателя. Рис. 3 также показывает, что для заданной объемной доли водорода, СЭД неуклонно снижается с увеличением коэффициента избытка воздуха и основные параметры двигателя падают более резко, чем в водородо-обогащенных системах. Когда коэффициент избытка воздуха больше чем водородо-обогащенные системы и несколько выше, чем у обычного двигателя. Чем больше увеличить СЭД, тем больше увеличится коэффициент избытка воздуха между водородо- обогащенным двигателем и оригинальным двигателем.

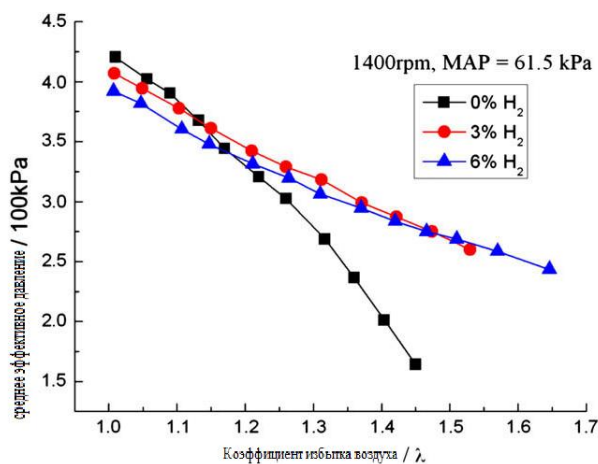


Рисунок. 1.11 – СЭД от избыточного профиля, соотношение воздуха на три объемной доли водорода.

Таким образом, можно увидеть, что добавление водорода может увеличить выходную мощность двигателя СС (система сгорания) Это потому что водород имеет гораздо меньшую плотность энергии по объему. На тех же оборотах двигателя, общий расход потока на входе поддерживается примерно постоянный. Однако содержание воздуха во впускной трубе постепенно уменьшается с увеличением объемной доли водорода в общем объеме потребления газа. Таким образом, содержание бензина в воздушно–топливной смеси необходимо дополнительно снизить для поддержания заданного коэффициента избытка воздуха при увеличении доли водорода. Это означает, что общий расход энергии в цилиндрах уменьшается при добавлении водорода. Известно, что СЭД двигателя в значительной степени коррелирует расход энергии, и чем больше энергии вводится, тем выше производительность СЭД достигается. Кроме того, горение двигателя немного улучшается с добавлением водорода, особенно в стехиометрических условиях. Таким образом, СЭД двигателя уменьшается с увеличением доли добавления водорода в стехиометрических условиях.

Длительность разработки и распространения пламени-два важных фактора, влияющих на тепловую эффективность двигателя.

Рисунок 1.12а показывает тенденцию колебания пламени. Как видно из рис. 1.12а, для чистого бензинового топлива без добавления водорода угол 0-10 резко возрастает с 23 до -35 с увеличением избыточного соотношения воздуха от 1 до 1,45; для бензино-водородной топливной смеси с добавлением 3% водорода угол 0-10 постепенно возрастает с 19 до 25 с увеличением отношения избыточного воздуха от 1 до 1,54 и для бензино-водородной топливной смеси с добавлением водорода на 6% , угол 0-10 неуклонно возрастает от 16 КА до 19 КА с увеличением отношения избыточного воздуха от 1 до 1,65. Кроме того, при тех же соотношениях избыточного воздуха угол 0-10 быстро уменьшается с увеличением доли добавления водорода, что означает, что задержка зажигания сокращается, а смеси бензино-водородного топлива являются более ранними и легче воспламеняются, чем бензин, что способствует быстрому и полному сгоранию бензино-водородных топливных смесей.

Хорошо известно, что топливо легче воспламеняться в богатых условиях, чем при стехиометрическом уровне, поэтому обедненная смесь нуждается в более продвинутой искре. Однако время искры в этом эксперименте фиксируется при 22 град от НМТ, что также усиливает такую тенденцию.

Поскольку водород имеет очень низкую энергию зажигания, энергия воспламенения водородно-бензиновой топливной смеси будет постепенно уменьшаться с увеличением добавления водорода, что намного ниже, чем у чистого бензина. Исследования показали, что добавление водорода способствует образованию в цилиндре радикала ОН, который эффективен для улучшения реакций цепной ветви и уменьшения периода развития флюидов.

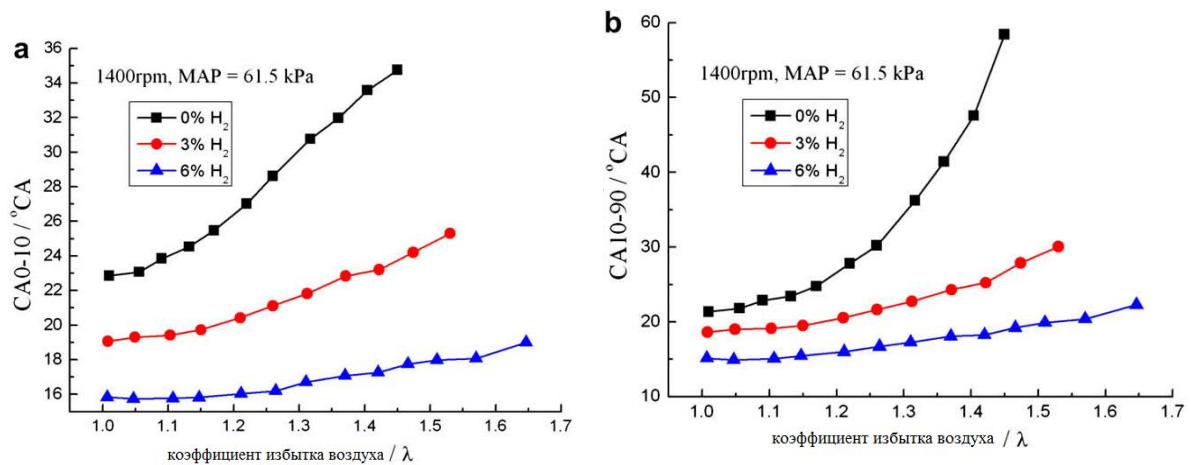


Рисунок. 1.12a – (a), Продолжительность разработки пламени в отношении профилей и отношения избыточного воздуха при трех долях объема водорода. (b) Продолжительность распространения пламени в отношении профилей отношения избыточного воздуха на трех долях объема водорода.

На рис.1.12b показаны вариации периода распространения (10-90) с избыточным отношением воздуха при 1400 об / мин для трех объемных долей водорода.

Продолжительность распространения пламени определяется как длительность угла кривошипа 10-90% тепловыделения общей бензиноводородной топливной смеси. То же самое, что и 0-10, 10-90, также увеличивается с увеличением избыточного соотношения воздуха из-за уменьшения энергии и скорости горения внутри цилиндра. Для данного избыточного соотношения воздуха 10-90 уменьшается с увеличением доли водорода. Это также можно объяснить быстрыми характеристиками горения и широким пределом водорода. Сокращенный 10-90 означает, что меньше топлива сгорает во время такта расширения, что эффективно для снижения потерь на выпуск.

На рис.1.12 также можно видеть, что изменения 0-10 и 10-90 с избыточным отношением воздуха для обогащенного водородом двигателя являются более плавными, чем изменения в чистом бензиновом двигателе, особенно при 6% -ной добавке водорода. Это связано с тем, что широкий диапа-

зон водорода позволяет обогащенному водородом двигателю выдержать больше условий разбавления.

Для 6% -ной добавки водорода, объемная доля водорода превысила свой нижний предел горения (приблизительно 4,1% по объему), водород в цилиндре можно легко сжечь после искры, поэтому двигатель с 6% процентным уровнем смешивания водорода намного ближе к двигателю с чистым водородом, который может работать в условиях сверхмягкого состояния.

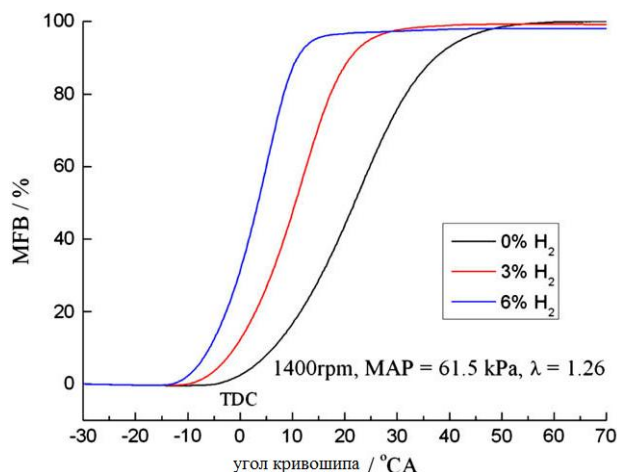


Рисунок 1.13 - Вариации МФБ с углом поворота с тремя добавками водорода и  $\lambda=1.26$ .

На Рис.13 показаны изменения сжигаемой массовой доли (МФБ) с углом кривошипа при трех водорода и  $\alpha=1,26$ . Из рисунка 1.13 можно видеть, что тепловыделение продвигается и ускоряется с увеличением доли добавления водорода в данном условиях обеднения. Сгорание, заканчивающееся на МФБ 90%, происходит при 36,8 град от ВМТ для исходного двигателя, 20,7 град от ВМТ для 3% обогащенного водородом двигателя и 10,8 град от ВМТ для 6% обогащенного водородом двигателя, соответственно, что указывает на то, что тепловыделение довольно ускоряется после добавления водорода.

### Выводы к первой главе

1) Применение мотором свойств топлива СПГ и его смесей с водородом, с целью усовершенствования собственных технико-

природоохранных данных.

2) . Полезные мероприятия модификации камер сгорания никак не дают возможность гарантировать полноту сгорания ТВС в ходе расширения рабочего корпуса больше 90%.

3). Это связано с тем, что быстродействующее свойство горения и широкая химическая стойкость к водороду помогают быстро сжигать бензино-водородную топливную смесь при определенном отношении избыточного воздуха.

4). Более того, высокая скорость диффузии водорода также делает смесь бензина и водорода и воздуха более высокой однородностью и, следовательно, стимулирует тепловыделение смеси бензол-водород.

5). По мере постепенного ускорения тепловыделения происходит сокращение периода после сжигания, что повышает тепловую эффективность двигателя и уменьшает несгоревшие выбросы НС.

**Из этих выводов вытекают следующие задачи исследования:**

1. Выявить на базе опытных экспериментальных сведений связь ключевых характеристик сгорания с химической ионизацией области турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических установок.

2. Определить потенциал увеличения производительности процесса сгорания на основе связи ключевых данных сгорания с химической ионизацией области турбулентного горения в поршневых ДВС и энергетических конструкций.

3. Определить потенциал увеличения устойчивости процесса сгорания на основе связи ключевых данных сгорания с химической ионизацией.

4. Определить, как влияет высокая скорость диффузии водорода на процесс сгорания.

5. Формулировка параметра, определяющего взаимосвязь скорости распространения пламени с ионным током химической ионизации.



## **Глава 2 Экспериментальное техническое оснащение и технологии выполнения и обработки результатов испытаний**

Работа, выполненная на основе магистерской работы с применением анализа работ А.Д. Дерячева, А.Я. Твердохлебова, П.И. Ивашина, М.П. Рамазанова [6,7,8,9] проанализируем, оборудование и технологии выполнения испытаний в их работах.

Анализ исследований, проводился, в оснащении специальной опытной основы, построенный с целью исследования данных распространения пламени в камере переменного объёма и их взаимосвязи с эффективностью деятельности ДВС и его токсичных характеристик.

Наиболее развернутая процедура исследования работы мотора и процедура сгорания, выполнялась на одноцилиндровых приборах, здесь контролировались характеристики мотора (температура сжатия, давление, температуры стен) при одинаковости абсолютно всех других характеристик.

### **2.1. Экспериментальное оборудование**

Распространение пламени и скорости изучались при использовании установки УИТ-85. Это все обусловлено химической ионизацией и шириной зоны горения (рисунок 2.1). Система конструкции согласно главным характеристикам отвечает конструкции автомобильного ДВС. В таком случае, она соответствует условиям, позволяющим довольно основательно осуществлять изучения процесса сгорания в условиях, приближенных к имеющимся в поршневых двигателях.

УИТ-85 смоделирован с наружным смесеобразованием с одноцилиндрового четырехтактного мотора с полезными параметрами – диаметр цилиндра 85 миллиметров и соотношением хода поршня к диаметру цилиндра  $S/D = 1.35$ . Одним из основных плюсов данной конструкции состоит в возможности менять степень сжатия. Привод коленвала (КВ) осуществляется электро-

мотором, этим гарантируется сохранение частоты вращения КВ в непрерывном состоянии при изменении разных исследуемых характеристик. Конструкция дает возможность осуществлять проведение исследования в двух режимах вращения коленчатого вала: с 600 до 900 (об/мин). Подготовка топливно-воздушной смеси выполняется либо с применением обычного одножиклёрного карбюратора, либо при впрыске горючего посредством форсунки в впускной канал. С целью предоставления гомогенности топливной смеси в конструкции смонтирован обогреваемый впускной трубопровод. С целью воспроизводимости итогов испытаний следует поддерживать стабильными в впускной системе температуру и влажность воздуха. Подобным способом система гарантирует наибольшую однотипность ТВС при переходе от цикла к последующему циклу, это приводит к внушительному уменьшению межциклового непостоянства (МЦН) работы конструкции, одно из условий, требуемых для соблюдения, при исследовании хода распространения пламени.



Рисунок 2.1 –Установка УИТ-85

Резьбовое гнездо сделано в головке камеры сгорания конструкции, в которое смогут вводиться ионизационные датчики разных систем. При этом

система камеры сгорания конструкции никак не изменяется. Система употребляемой конструкции гарантирует управление ключевых режимных характеристик при проведении разных анализов. Исследуемый анализ характеристик устанавливает взаимозависимость условия на процессы распространения пламени и вредоносные выделения в ОГ. Всё данное доказывает вероятность конструкции повторения с высокой верностью систем тестирований – считается значимым условием при исследовании процессов сгорания. Итоги исследований изучений распространения пламени в камерах сгорания ДВС, где применялись ионизационные датчики разных систем, позволил аргументировать применение конструкции УИГ-с целью моделирования действий, реализующихся в машинных двигателях и поршневых конструкциях.

Схема опытной конструкции, употребляемой при проведении тестирований, представлена на рисунке 2.2

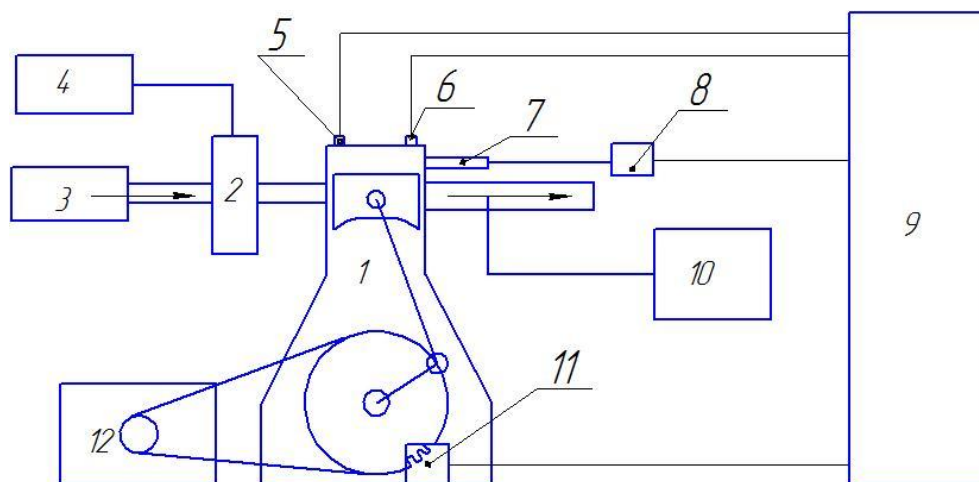


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки: 1 - УИГ-85 – одноцилиндровая моторная установка; 2 – форсунка впрыска топлива; 3 – система для впуска воздуха и система измерения расхода воздуха; 4 - система подачи топлива с системой измерения расхода топлива; 5 - датчик регистрации давления в камере сгорания; 6 - ионизационный датчик; 7 - свеча зажигания; 8 - система регистрации подачи и наличия искрового разряда; 9 - система сбора экспериментальных данных и характеристик работы установки ; 10 – газоанализатор; 11 - датчик положения коленчатого вала; 12 – электродвигатель привода коленчатого вала

На позиции 1 представлен модуль стенда, сама установка состоит из одноцилиндрового четырехтактного мотора, к нему на позиции 12, добавлен гальванический привод от асинхронного двухскоростного электромотора. Эта установка осуществляет пуск и задает частоту вращения коленчатого вала. На экспериментальном оснащении действует панель управления, измеряющая характеристики конструкция и дополнительные датчики.

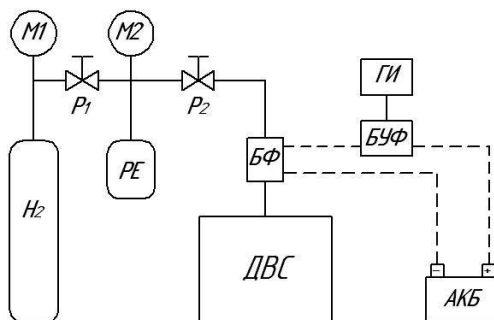


Рисунок 2.3 – Система добавки водорода в ТВС: H<sub>2</sub> - баллон с водородом; M1, M2 – манометры; P1, P2 – редукторы; PE –расходная емкость; БФ – блок форсунок; БУФ – блок управления форсунками; ГИ – генератор импульсов; АКБ – аккумуляторная батарея

На рисунке 2.3 изображена схема использования элементов системной установки подачи водорода. По схеме заметно, что впускной проток конструкции, посредством форсунок и редукторов, заполняется водородом, который берется с баллона. Предотвращение флуктуации давления газа выполнялось поддержанием перед форсунками непрерывного перепада давления, одинакового  $\Delta P = 0,35$  МПа.

## 2.2 Описание методики проведения эксперимента

Проявление проводимости электронов в углеводородном пламени совершалось с помощью одноцилиндровой системы с датчиком, это и отображало процесс горения в КС.

Исследование пламени проводилось и изучалось при помощи разных способов, а также, проводились исследования по уменьшению вредных выбросов, для этого снимались все показатели двигателя

Для того чтоб установить свойства ДВС, нужно найти другой признак, который конкретизирует сгорание пламени

Так как водород являлся целью данного изучения, он добавлялся для понимания свойств сгорания и для определения химического состава топлива

Доля водорода исследовалась с влиянием на сгорание в моторной установке, некоторые свойства характеристик и качеств определены с помощью регулирующих качеств, которые находились с помощью формул нахождения УОЗ и консистенции. Рабочее движение особенностей протекания реакций, позволяют надежно и обобщенно обособить характеристики жидкого и газообразного топлива на свойства сгорания. Мы получаем целые числа, результаты и воздействия химического состава газообразного топлива с долей водорода в консистенции смеси.

К образцу, изучение добавок водорода в ТВС непосредственно объединено с определенным воздействием в процедуру сгорания в моторе, в таком случае в свойстве основных сведений присутствие и проведении направленных исследований использовались качества регулирующих данных согласно формуле консистенции и УОЗ. Простая структура регулятора для времени искры, где свеча зажигания работает как интегрированный привод и датчик. Используемая свеча зажигания-обычная свеча зажигания. Ток ионизации образуется с помощью интегрированной системы зажигания и измерения, описанной в пунктах, и алгоритм интерпретации дает оценку ППП. Опорное значение для ППП дает возможность иметь разные расписания зажигания для различных рабочих точек, т. е., достичь других целей, кроме максимизации работы.

С большими колебаниями, коэффициент усиления обратной связи должен быть выбран меньше, так чтоб вариации не влияли на искру слишком

долгое время. Снижение чувствительности контроллера с меньшим коэффициентом усиления приводит к более медленному циклу обратной подачи. Факты, которые мы заметили в проведенных исследованиях и изучениях представлены: структура смеси, частота вращения коленчатого вала, добавляемый водород в ТВС, УОЗ.

Зондирование тока ионизации в цилиндре, дает возможность оценить эффективность сгорания и контролировать искровое продвижение. Интерпретация ионизации в настоящее время также доказала свою экономическую эффективность и уже используется, например, для обнаружения пропусков зажигания и фазового зондирования, как в производственных автомобилях, так и в других приложениях. На рисунке 6 показана возможность использования свечи зажигания в качестве датчика с несколькими параметрами, связанными с сжиганием. Свеча зажигания функционирует в качестве привода и нескольких датчиков. Положение пикового давления-это сигнал, который используется для управления передачей искры. Измерение подгонки показывает, насколько отличается измеряемый ток и модель. При разных составах смеси создали особую характеристику разных факторов.

Измерялись и диагностировались разные факторы величин, такие как: угол зажигания, давление индикаторное, доли водорода, сжиженный газ, количество топлива, степень сжатия, а также проводились измерения выбросов вредных веществ в атмосферу такие как: оксид азота.

Смесь подвергают длительным нагревом температуры равной 54°C, для того чтоб получить идеальный состав, это все делалось подогревом особенного элемента в конструкции, еще ставился датчик чтобы получить измерения на компьютере.

Особенный контроль проводился с помощью дополнительных микродатчиков, каковые, выдавали замеры температур, влажности воздуха, и на компьютер поступали сигналы состояния установки, а именно: нагрев масла в картере и температуру ОЖ

Умная установка способна, без вспомогательных внешних устройств, приборов модифицировать степень сжатия ( $\epsilon$ ). Она способна с помощью червячной передачи и линии передвигать головку, тем самым увеличивая или уменьшая степень сжатия с 4.5 до 11 ( $\epsilon$ ). Рабочие модифицировали установку и теперь датчики производят замер воздуха и расход топлива.

Горючее наливалось в измерительный резервуар для процесса выполнения регистраций расхода. Конструкция подачи горючего накачивалась помпой с целью вытаскивания воздуха и заполнения бензином. Поплавковая ячейка функционировала совместно с растрчиваемой емкостью, в подобных условиях, при постоянном поддержании степени топлива в поплавковой камере, миниатюризуется объем.

Растрчиваемая емкость, которая располагается на весах с целью дальнейшего установления массы расхода топлива.

Система для установления числа расходуемого топлива сохраняет лабораторные весы VM 512, 2-ая категория точности. Весы с ПК сопряжены с поддержкой COM-порта.

Весы были смонтированы подобным способом, для того чтобы уровень их конструкции гарантировал приток горючего в поплавковую камеру за счёт перепада возвышений в отсутствии срыва герметичности уплотнений. В построении подачи горючего никак не предусматривалось существование приборов с целью слива остального горючего в заправочный резервуар.

Имеющаяся конструкция подачи горючего гарантировала использование опытной конструкции всего топлива с поплавковой камеры, прибывающего из измерительного резервуара. С целью предоставления непрерывного уровня горючего применялся указатель уровня.

Лабораторные весы с измерительным резервуаром (ёмкостью), установленные на нужной возвышенности, представлены на рисунке 2.4



Рисунок 2.4 – Лабораторные весы с измерительным резервуаром BM 512

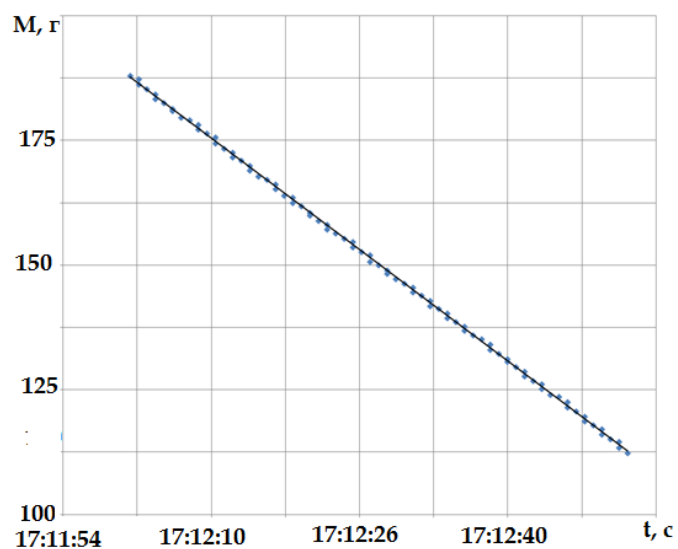


Рисунок 2.5 –Результаты тарировки показаний весов

ПК подсоединен к весам при помощи проводов и СОМ разъемов, мгновенное измерение и сохранение массы совершалось за 0.1 с и определение периода замерялись на ПК, при помощи модифицированного ПО.

Итоги тарировки весов с целью выполнения исследований и обработки итогов замеров представлен на рис. 2.5.



На рисунке 2.6 представлено фотоизображение зубчатого диска и оптического измерителя положения коленчатого вала.

Определение значимости угла опережения зажигания выполнялось применением электромагнитного измерителя каковой был соединён с высоковольтным проводом конструкции зажигания (изображение 2.7). Когда поступал импульс тока на датчик, находящийся в свече зажигания он приобретал сигнал. Этот импульс перестраивался в линейный и собирался для регистрации опытных сведений.



Рисунок 2.6 – Фотография зубчатого диска и оптического датчика



Рисунок 2.7 – Фотография электромагнитного датчика искры

Определение ионных токов производилось при применении 2-ух ионизационных измерителей (ИД), системы которых изображены в рисунках 2.8 и 2.9. ИД складывается из электрода (ИЗ), отдельного от корпуса с поддержкой керамической трубки.

Другим электродом, минусовым, считаются железные компоненты мотора, в этом случае – корпус измерителя. Ионизационный датчик, находящийся в 1-ом корпусе с свечой зажигания, рис. 2.8 рассчитанный с целью установления данных передвижения пламени в 1 фазе сгорания. Датчики, изображенные на рис. 2.9 дают возможность устанавливать свойства передвижения фронта пламени в главной фазе сгорания, а кроме того перемена сжатия, расширения и индикаторного давления в тактах впуска, и, в характерные черты при сгорании ТВС.

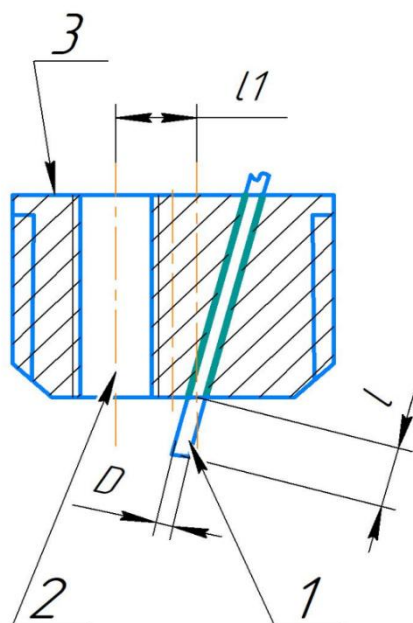


Рисунок 2.8 – Схема ИД, изготовленного в одном корпусе со свечой зажигания 1- зонд (ИД); 2 – отверстие для установки свечи зажигания; 3 – корпус датчиков

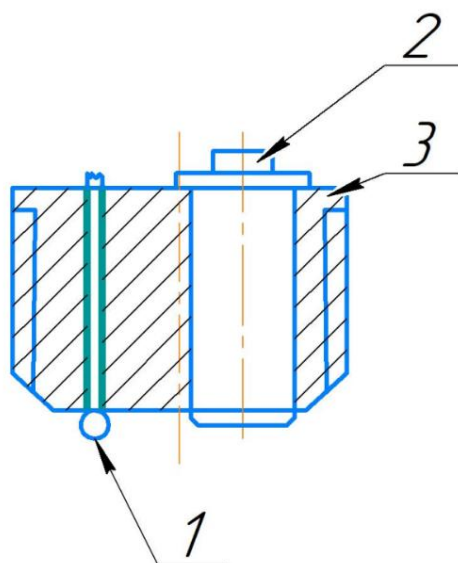


Рисунок 2.9 – Ионизационный датчик в одном корпусе с датчиком давления: 1 – зонд(ИД); 2- датчик давления; 3 – корпус датчиков

Омывающее, электрод и систему мотора, пламя, замыкает гальвоническую цепь, в каковой происходит возрастание ионного тока, который сможет в будущем характеризовать углеводородное пламя

На современной установке 2.10 схематически обрисованы зоны ИД. Первый датчик находящийся в самой свече зажигания, был расположен на дистанции 7мм от электрода, а иной в расположении далеко от свечки зажигания, т.е. в дистанции 85 миллиметров.

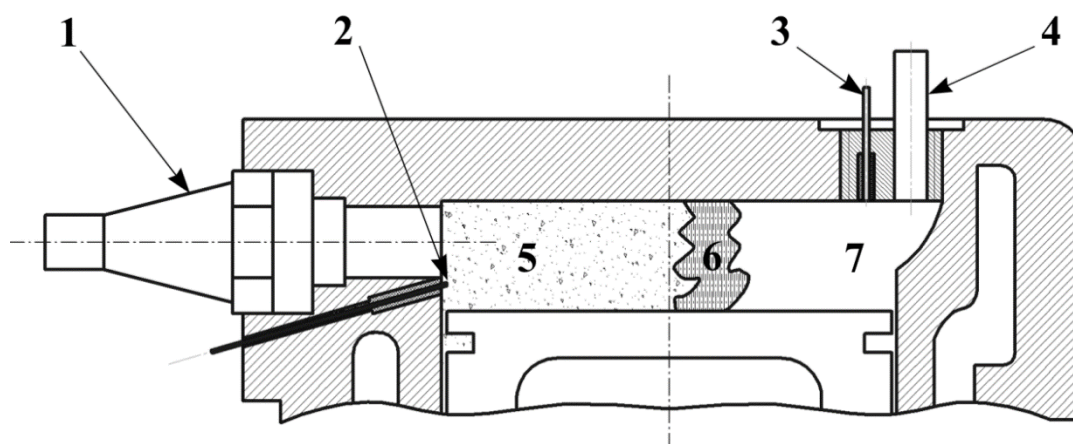


Рисунок 2.10 – Схема камеры сгорания с датчиками ионизации: 1- свеча зажигания; 2- ионизационный зонд №1; 3- ионизационный зонд №2; 4- датчик давления ДМВГ 50; 5- продукты сгорания; 6- фронт пламени

Основным образующим компонентом считался контролируемый ресурс постоянного напряжения Mastech DC Power Supply NY3001E. С целью убавления вибраций на выходе источника питания, был обустроен неполярным конденсатором, так как измерялись незначительные токи. Никак не полагая только лишь данного, осуществлялось выключение ключа питания с конденсатора, с целью применения заряда, для того чтобы устранить помехи, разносимые источником питания. С целью данного необходима корректировка характеристик конденсатора и допустимые изменения. Если фронт пламени омывал электрод и компоненты камеры сгорания, совершалось замыкание электрической цепочки с возникновением в ней ионного тока, появляющегося из-за химической ионизации в пламени углеводородного горючего.

Регистрирование ионного тока и обрабатывание результатов замеров велась с поддержкой намеренно созданного программного обеспечения с целью применения на компьютере. Полезные характерные черты конструкции, подбор пункта заземления на элементе тела и предоставление технической сохранности фиксируемых характеристик, понадобилось создать концепцию электрической развязки, интегрированную в высоковольтную цепочку побуждения ионного тока и в контрольный ряд, связанную с АЦП.

Электрическая модель гетерополярного тока с интегрированной электрической развязкой показана на рисунке 2.11

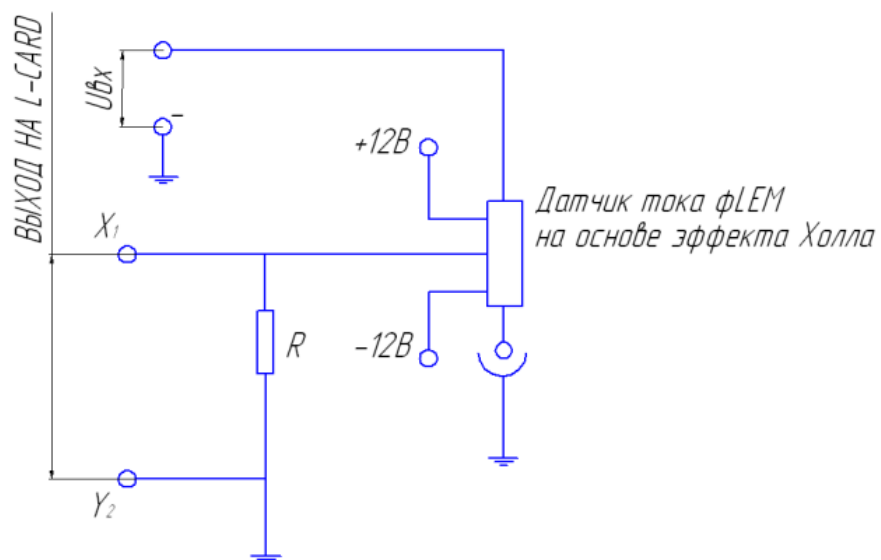


Рисунок 2.11 –Электрическая схема записи ионного тока с встроенной гальванической развязкой

Для того, чтобы определить движение горения с разбором энергетических характеристик пламени в ДВС, произведено индицирование, здесь вытекают главные образующие:

- датчик давления с уменьшением или увеличением;
- усовершенствованная головка, отличающаяся термостабильностью, в которую вставлялся, датчик давления и отличающийся динамическими погрешностями
- совокупность с целью регистрации итогов замера.

Измерение давления выполнялось с поддержкой датчика давления компании Kistler (Швейцария). Прибор соединен в 1 корпусе с свечой зажигания и обладает дальнейшими качествами:

- вид 6117BFD17 номер в серии 992713, прокалиброван 03.12.2009 г, стереоусилитель Kistler 5011B № 602394; - диапазон, определяющий чув-

СТВИТЕЛЬНОСТЬ:

- а) 0-200 бар - 17,59 pC/bar, линейность не хуже +/- 0,02%;
- б) 0-50 бар - 23 grad C - 17,57 pC/bar, линейность не хуже +/- 0,01%;
- в) 0-150 бар - 200 grad C - 17,41 pC/bar, линейность не хуже +/- 0,03%;
- г) 0-500 бар - 200 grad C - 17,38 pC/bar, линейность не хуже +/- 0,07%.

Состав проработавших газов складывался при применении газоанализатора «Автотест» компании Мета класс точности 0. При проведении анализа проработавшего газа сформировывалась сосредоточение последующих компонентов: CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>.



Рисунок 2.12 –Газоанализатор фирмы Мета

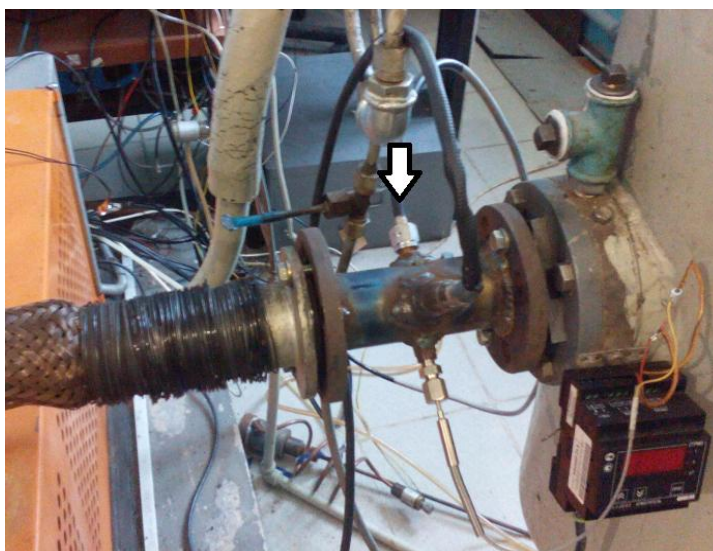


Рисунок 2.13 – Фотография места отбора проб ОГ (показано стрелкой)

Функциональность газоанализатора оснащалась намеренно исследованной системой отбора и остывания проб обработавших газов в выхлопном трубопроводе. Фото зоны отбора проверок ОГ показана на рисунке 2.13. Подбор газа выполняется с измерительной зоны посредством особенного патрубка, следующее действие которое будет происходить это остывание жидкости, переходящее в газовое состояние посредством спецфильтра.

Особенный насос который осуществлял переборс газа, который находился в системе с газоанализатором. Сохранение сигналов исполняется с использованием концепции сбора сведений L - 783М (формирование L-Card). Абсолютно всем подходящая стремительная стоимость на шину PCI, что гарантирует вероятность ввода в мегагерцовом диапазоне аналоговых сигналов, а с целью числовых сигналов - ввод/вывод. Качества АЦП: 12 бит/ 3МГц, число трудовых каналов 16.

Предварительное исследование сигналов необходимо с целью раскрытия неопределённых сведений при работе любой конструкции регистрации параметрических (отметчика искры зажигания, положение вала коленчатого, массового расхода атмосферы, топлива) условий и итогов анализов. В

ходе предварительного разбора расценивается наличие сигналов, соотношение признаков – препятствие.

Для извлечения достоверных сигналов, распространяющихся в КС, отображающих ионный ток в пламени, только лишь с целью 1-го порядка, необходимо статистическое перерабатывание большого количества осциллограмм последовательных циклов. В данном случае усреднялись никак не меньше 50-ти циклов, каковые вписывались в процесс 1-го порядка. Проводился анализ местоположения данных, воспринимался и вид межциклового рассеяния. С целью давящего порядка системы установлено простое размещение данных балла сигналов. В случае если размещение значительно отличалось от обыкновенного, воспринималось завершение о повторе порядка, в некоторых случаях оно прогонялось с обрабатываниями.

### **2.3 Методика обработки результатов испытания**

Расход топлива  $G_T$  определялся по формуле

$$G_T = \frac{\Delta M}{\Delta \tau}, \quad (2.1)$$

$\Delta M$  – изменения массы ТВС;

$\Delta \tau$  – определенное количество времени при разнице изменения массы ТВС.

Чтобы отыскать соотношение пропорций частей состава горючей консистенции была придумана и сделаны участки с целью установки концепции замера расхода воздуха модель конструкции показана. На рисунке 2.14 и представлены ключевые компоненты исследованной системы.



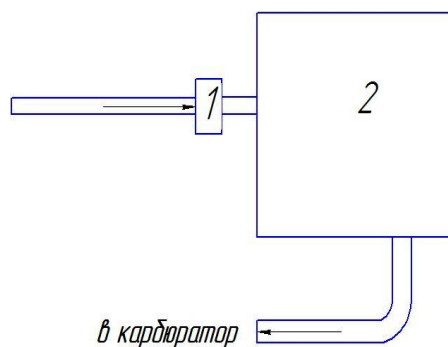


Рисунок 2.14 – Схема системы измерения расхода воздуха. 1 – датчик массового расхода воздуха; 2 - ресивер

Уменьшить пульсацию воздуха, получилось введением в конструкцию небольшого ресивера, для более точного и целевого измерения расхода воздуха.

Термоанемометрический измеритель компании BOSCH, который измерял расход воздуха, использовался с целью точного замера массового расхода воздуха. Он был откалиброван, отвалидирован и модифицирован работниками кафедры в линейном потоке.

2-мя способами совершались проверки:

- объемным способом (мотором тратился небольшой размер воздуха, однако осуществлялось непрерывное влияние в впускном канале); - сравнением с итогами замеров согласно широкополосному измерителю нахождения концентрации воздуха (ф. ETAS) в то же время с измерением массового расхода топлива.

Калибровочную линию возможно проанализировать на рисунке 2.15. Она аппроксимировалась полиномой второй степени

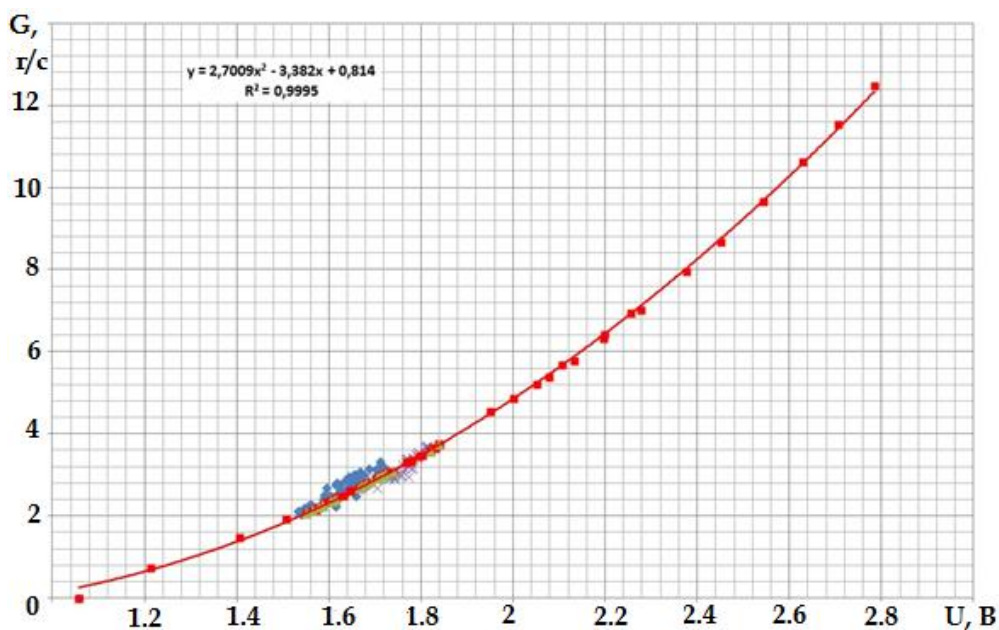


Рисунок 2.15 – Тарировочная кривая датчика расхода воздуха

Подобранная опытным путем пористость форсунок гарантировала данное потребление газа через конструкции. Чтобы изменить растрчиваемую характеристику форсунок разрешено отключить определенное число форсунок или 1-у. Подобным способом, связь от тарировки меняется в значении расхода водорода, каковую допустимо прекратить отключив форсунку.

Для установления расположения коленчатого вала сравнительно мёртвых точек был спроектирован и сделан особый дискозубчатый накопитель, содержащий 60 зубцов и маркеры ВМТ и НМТ, каковой был смонтирован на нос коленчатого вала. Регистрирование положений зубчатого диска сравнительно ВМТ и НМТ, и поддержка итогов замеров, применяемых с целью деятельности индикаторными диаграммами исполнялась с поддержкой оптического измерителя Honeywell. Погрешность производства зубчатого диска считалась главным фактором ошибок. Кроме того, неточности записывались вслед за гулом при регистрации сигналов, а кроме того из-за погрешностей при обрабатывании и проведении рассмотрения итогов, записанных в АЦП.

На рисунке 2.16 представлена осциллограмма журнал исследуемых характеристик.

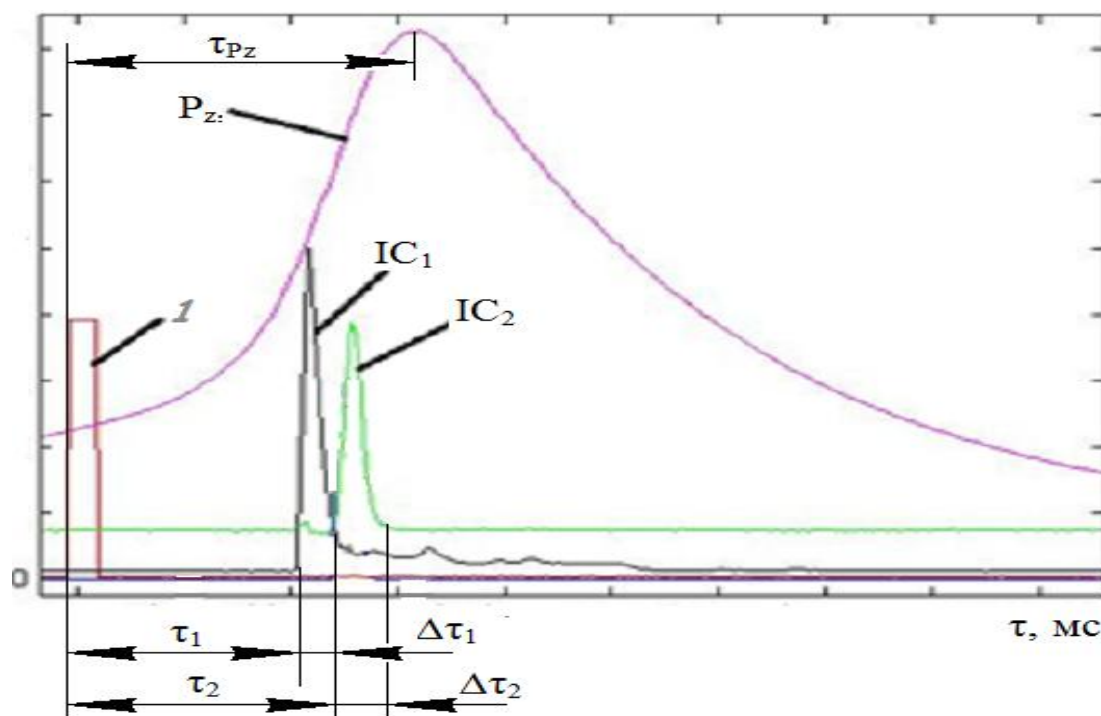


Рисунок 2.16 – Осциллограмма записи исследуемых параметров

Продолжительность импульса наличия ионного тока обуславливается периодом омывания пламенем электродов ионного датчика ( $\Delta\tau$ ).  
 Сообразно данным заключениям, сведения и измерения ионизационного тока, показывают настоящие характеристики пламени, снятых с электродов ИД. При одинаковом измерении индикаторного давления вводились данные электропроводности, и так же замерялась концентрация токсичных веществ, из этих полученных сведений можно сделать выводы по уменьшению выбросов. Нахождение определенной средней скорости, с каковой расширяется огонь изготавливалось согласно формуле:

$$U_{cp} = \frac{L}{\tau}, \quad (2.1)$$

Замерялась скорость с которой распространяется пламя между электродами на датчике, для этого использовалась формула

Где  $L$  – дистанция ИД и свечи зажигания

$\tau$  – это промежуточное время зажигания вплоть до образования ионизационного тока в секундах

С целью установления окрестной скорости, с каковой расширяется пламя, меж электродами на торце тела датчика применялась формулировка где  $L_{1-2}$  – дистанция среди электродов ИД, м.;

$\tau_{1-2}$  – период момента между возникновением ионного тока у определенных электродов ИД, с.

Исследование характеристик области горения, в особенности ее объемов, в ДВС с искровым зажиганием потребует больших физических потерь, с целью данного необходимо исследовать характерные черты действий тепло- и массоперенос, распределения состава топливной смеси температурного поля и в абсолютно всём месте КС. Однако целиком определенные понятия о динамике фронта огня углеводородного горючего характеризующие насыщенность протекания хим. взаимодействий горения. Цепные взаимодействия горения проходят согласно механизмам до такой степени трудными, что в наш момент они никак не обладают соответственным содержанием. Они содержат в себе, помимо диффузии ещё разделение элементов, их разделение и конденсацию.

Многостороннее исследование характера искривлённого беспорядочного фронта огня, дает возможность позволить вероятность установления ширины области турбулентного горения при применении данных, приобретенных с применением сигналов ионизационных измерителей.

Анализ итогов изучения свойств, с каковыми огонь расширяется в камере с применением итогов согласно измерению ионных токов и давления сгорания [11] обнаружил, то что с целью линии систем тестирований передвижение огня среди свечи зажигания и ионизационным измерителем вынашивает скрученный вид.

Передвижение пламени, в изучениях ширины зоны турбулентного горения, от свечи, имело прямолинейный вид

В энергетических конструкциях согласно итогам всех изучений и экс-

периментов установлены свойства, определяющие рабочий ход

Прибавление в топливо диффузионного водорода и изучение массовой численности велось по формуле:

$$g_{H_2} = \frac{G_{H_2}}{G_{H_2} + G_B}, \quad (2.2)$$

где  $G_{H_2}$  – массовая доля водорода в ТВС;

$G_B$  – массовая доля бензина в ТВС.

Это объясняется выражением, в данном случае мы рассматриваем массовые доли углерода только в газообразном топливе:

$$g_C = \frac{1 - g_{H_2}}{1 + \alpha \cdot [L_{CH_4} \cdot (1 - g_{H_2}) + g_{H_2} \cdot L_{H_2}]} \cdot \frac{\mu_C}{\mu_{CH_4}}, \quad (2.3)$$

где

$L_{CH_4}$  – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг метана ( $L_{CH_4} = 17,28$  кг);

$L_{H_2}$  – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг водорода ( $L_{H_2} = 34,48$  кг);

$g_{H_2}$  – массовая доля водорода в топливной смеси;

$\mu_C$  – атомная масса углерода ( $\mu_C = 12$  г/моль);

$\mu_{CH_4}$  – молекулярная масса метана ( $\mu_{CH_4} = 16$  г/моль);

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

## Глава 3 Обработка результатов экспериментов и их анализ

### 3.1 Зависимость ионного тока от величины прибавляемого в нее водорода, состава ТВС и скоростного режима двигателя

Изучив теорию исследователей и сняв показатели с УИТ-85 мы получили изображения ионных токов, данная установка работала в режимах вращения КВ 600 об/мин и 900 об/мин при разном стехиометрическом коэффи-

циенте и долей добавленного водорода, таблица А.1 приложение А. На рисунках представлены зависимости ионного тока на ИД при различных добавках водорода и разном стехиометрическом коэффициенте,

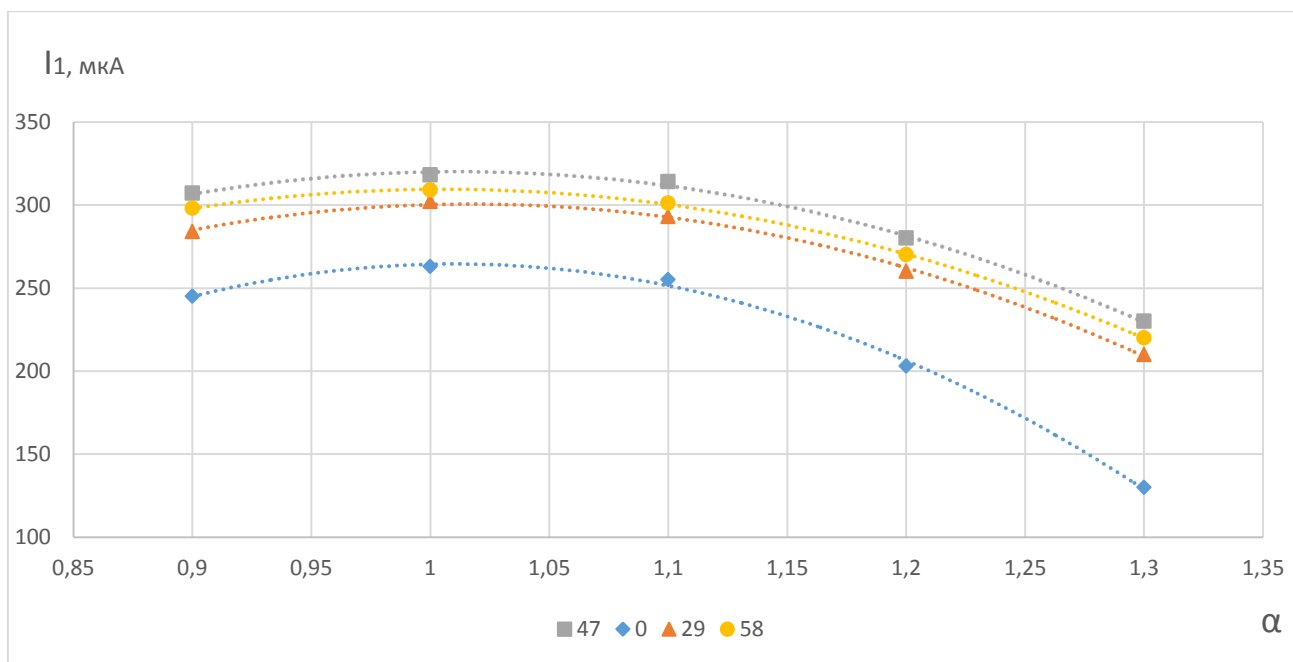


Рисунок 3.1 - Зависимость ионного тока ( $I_1$ ) на ИД, расположенном у свечи зажигания, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли водорода в ТВС ( $n_{КВД} = 600$  об/мин), где  $\diamond - r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta - r_{H_2}=29\%$ ;  $\square - r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ - r_{H_2}=58\%$ .

На рисунке 3.1, проведена зависимость ионного тока находящегося в непосредственной близости к свече зажигания. Из этого графика мы видим, связь величины тока на индук. датч. от стехеометрического коэффициента, содержит приблизительно равную форму для абсолютно всех добавок водорода и скоростных режимов. По первому графику становится ясно, что самые большие ионные токи появляются при коэффициенте избытка воздуха, равному 1. При добавке водорода в 29% происходит ощутимое повышение значения ионного тока, причем это наблюдается на всех  $\alpha$ , когда мы увеличиваем добавку водорода до 47% не прослеживается видимого увеличения ионного тока.

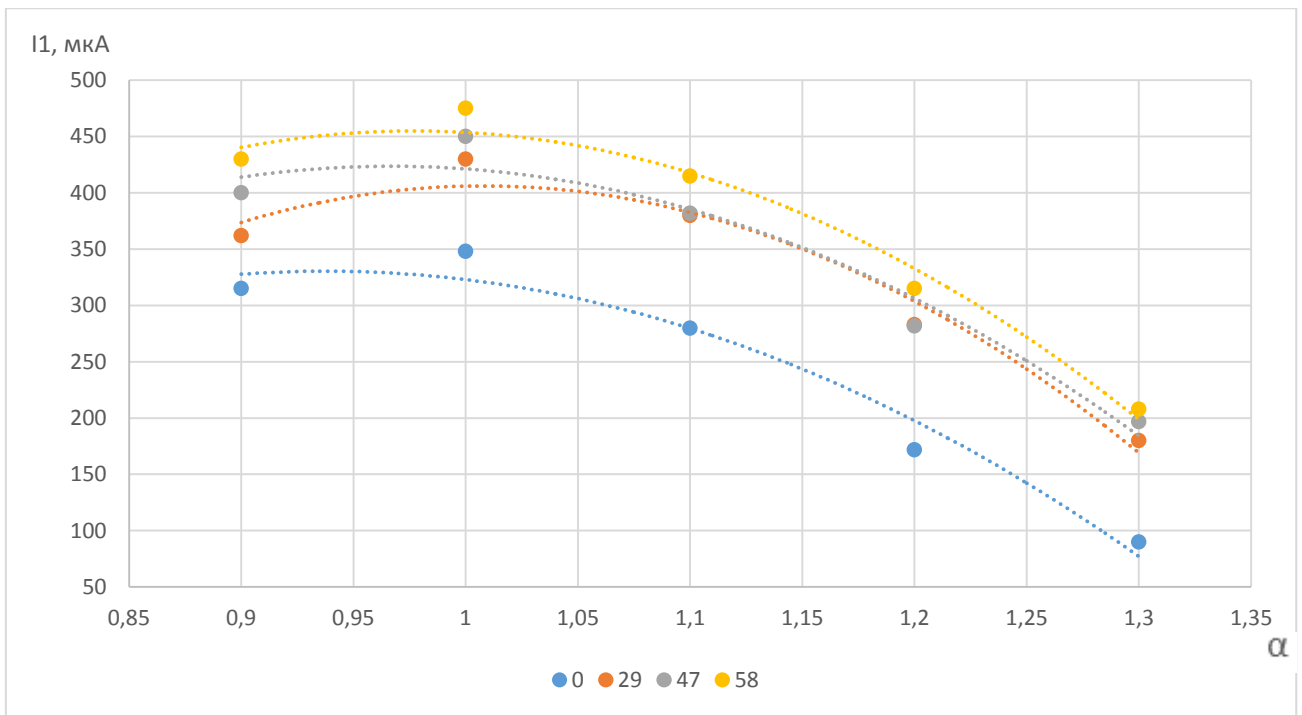


Рисунок 3.2 - Зависимость ионного тока ( $I_1$ ) на ИД, расположенном у свечи зажигания, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли водорода в ТВС ( $n_{квд} = 900$  об/мин), где  $\diamond - r_{H_2} = 0\%$ ;  $\Delta - r_{H_2} = 29\%$ ;  $\square - r_{H_2} = 47\%$ ;  $\circ - r_{H_2} = 58\%$ .

На рисунке 3.2, проведена зависимость ионного тока находящегося в непосредственной близости к свече зажигания таблица А.2, приложение А. Из этого рисунка видно, что при вращении коленчатого вала в 900 оборотов/мин, ионный ток, выше чем при 600 об/мин и связь величины тока на ИД. от состава смеси, содержит приблизительно равную форму для всех добавок водорода и скоростных режимов. Наибольшие ионные токи находятся, при коэффициенте избытка воздуха равному 1. Так же, при добавке водорода в 29% происходит быстрый прирост ионного тока, при последующем повышении насыщенности водорода, не прослеживается видимого увеличения ионного тока.

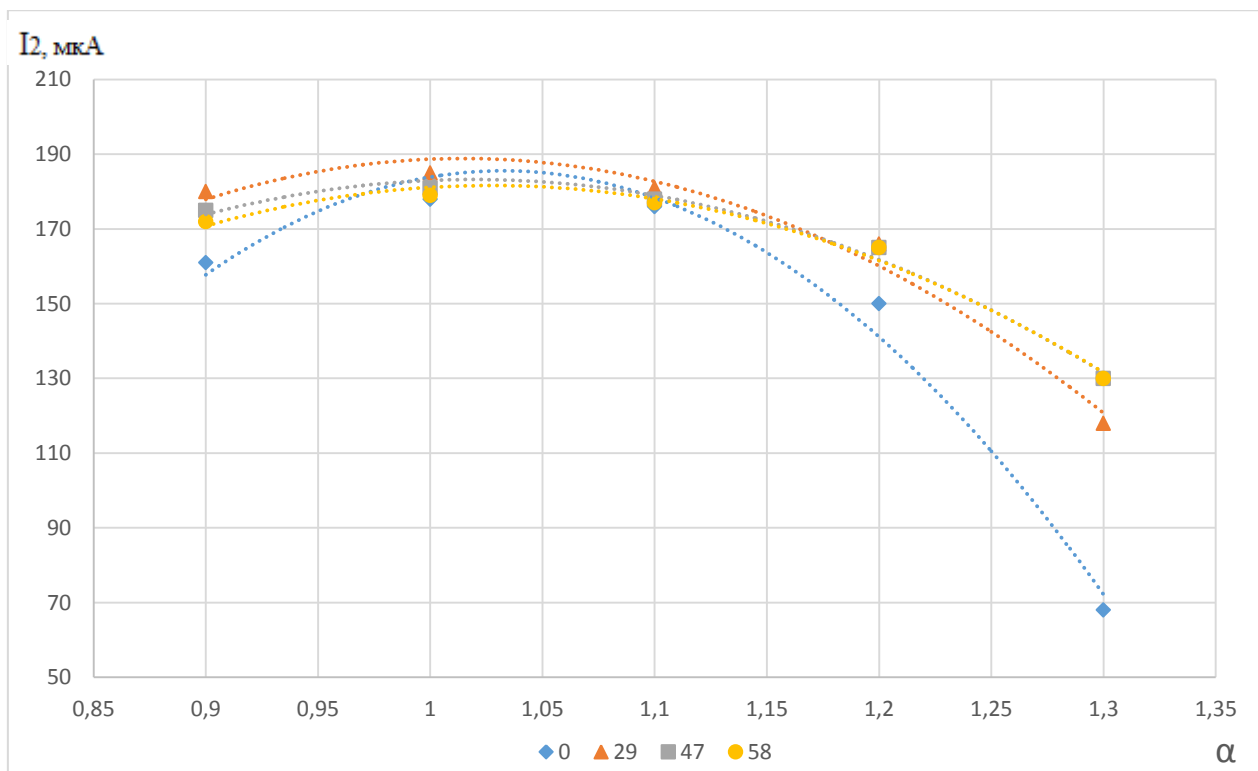


Рисунок 3.3 – Зависимость ионного тока ( $I_2$ ) на ИД, удаленном от свечи зажигания, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли водорода в ТВС ( $n_{\text{КВД}} = 600$  об/мин), где  $\diamond$  –  $r_{\text{H}_2} = 0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{\text{H}_2} = 29\%$ ;  $\square$  –  $r_{\text{H}_2} = 47\%$ ;  $\circ$  –  $r_{\text{H}_2} = 58\%$ .

На рисунке 3.3, проведена зависимость ионного тока, находящегося на удаленном расстоянии от свечи зажигания, таблица А.1 приложение А. Из этого графика мы замечаем, что связь величины тока на индук. датч. от стехеометрического коэффициента, содержит приблизительно равную форму для абсолютно всех добавок водорода и скоростных режимов. В отличие от индукционного датчика расположенного у свечи зажигания этот датчик, при разных добавках водорода кроме бедной смеси  $\alpha = 1.3$ , не увеличивает ионный ток. Заметное повышение ионного тока наблюдается на бедном ТВС при  $\alpha = 1.3$ , при добавке водорода в 29%, при последующем повышении насыщенности водорода не прослеживается видимого увеличения ионного тока.



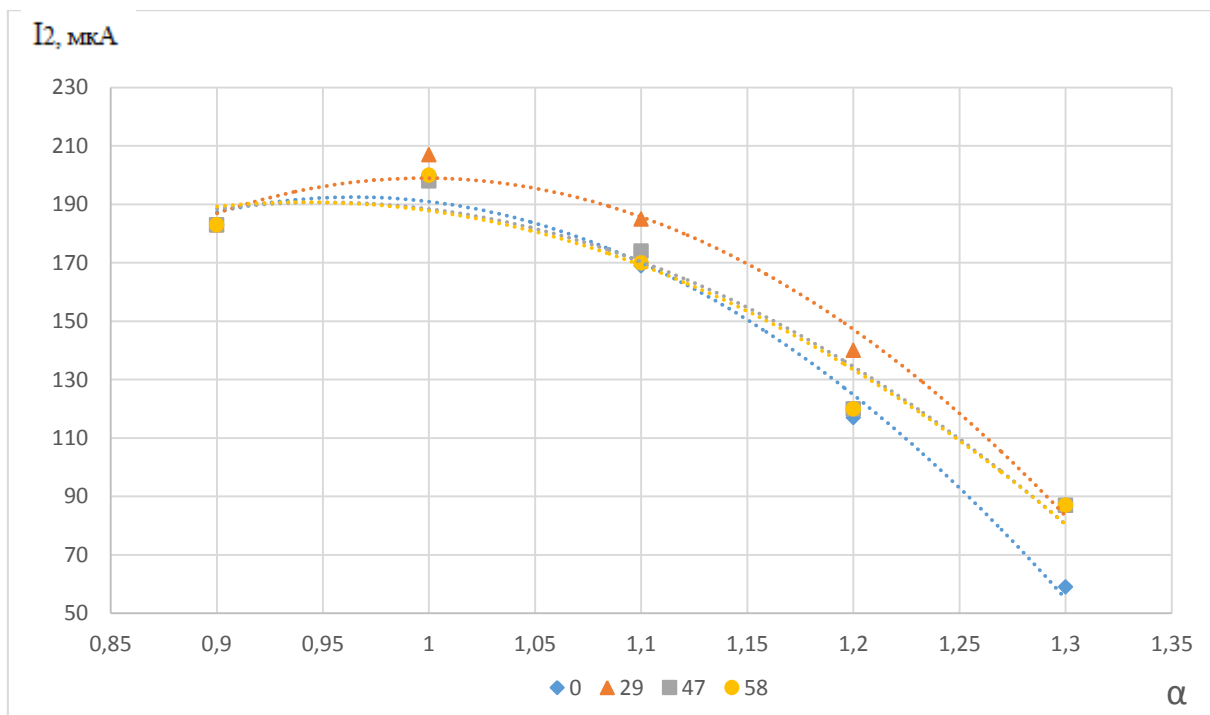


Рисунок 3.4 – Зависимость ионного тока ( $I_2$ ) на ИД, удаленном от свечи зажигания, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли водорода в ТВС ( $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин), где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=29\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=58\%$ .

На рисунке 3.4, проведена зависимость ионного тока, находящегося на не большом расстоянии к свече зажигания, таблица А.2 приложение А. Из этой зависимости видно, что при вращении коленчатого вала в 900 оборотов/мин и при любых добавках водорода, ионный ток, ниже чем при 600 об/мин, и тенденция увеличения ионного тока меньше у  $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин чем при  $n_{\text{КВД}}=600$  об/мин. Наибольшие ионные токи находятся, при коэффициенте избытка воздуха равному 1. В отличие от индукционного датчика расположенного у свечи зажигания этот датчик, при разных добавках водорода кроме бедной смеси  $\alpha=1,3$ , не увеличивает ионный ток так заметно, но видимое повышение ионного тока наблюдается на бедном ТВС при  $\alpha=1,3$ , при добавке водорода в 29%, при последующем повышении насыщенности водорода не прослеживается видимого увеличения ионного тока.

### 3.2 Средняя скорость фронта пламени в 1-ой и основной фазах сгорания и её взаимозависимость от состава топливовоздушной смеси, величины прибавляемого в нее водорода и скоростного режима двигателя

В этой экспериментальной работе находилась длительность 1 и 2-ой фаз сгорания, надлежащие распространению фронта пламени через всю КС и у свечи зажигания соответственно

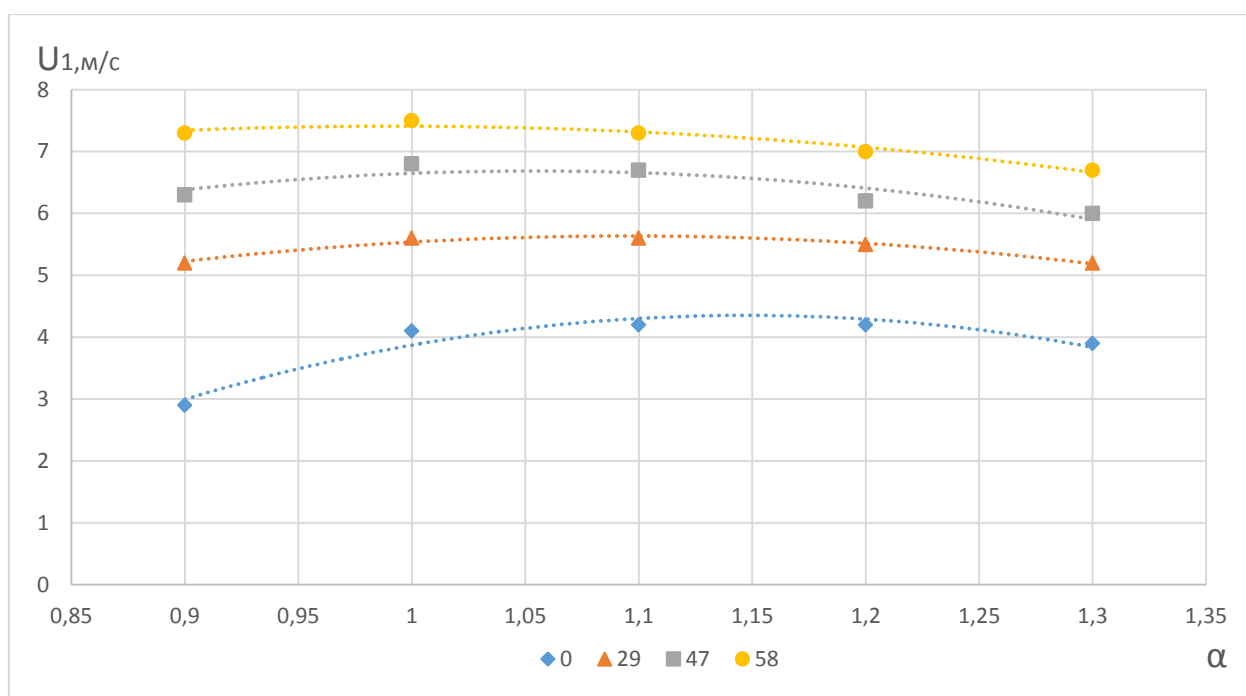


Рисунок 3.5– Первая фаза сгорания, зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода ( $n_{КВД} = 600$  об/мин), где  $r_{H_2}=0\%$ :  $\diamond$ ;  $r_{H_2}=29\%$ :  $\Delta$ ;  $r_{H_2}=47\%$ :  $\square$ ;  $r_{H_2}=58\%$ :  $\circ$

Мы получили зависимость средней скорости распространения фронта пламени в первой фазе сгорания при различных добавках водорода, таблица Б.1 приложение Б. Анализируя полученные значения, показанные на рисунке 3.5, мы видим, что для данного скоростного режима, прослеживается повышение средней скорости распространения пламени при различных добавках водорода

(29%,47%,58%) в ТВС, и остается квадратичный закон связи скорости от стехиометрического коэффициента, при этом вне зависимости от насыщенности водорода. Как видно из графиков при более богатой смеси ( $\alpha=0.9$ ) появляется линейная зависимость прироста скорости распространения пламени от 29%до 58% скорость  $U_1$  увеличивается быстрее, чем на бедной смеси  $\alpha=1.3$ , это все при 600об/мин.

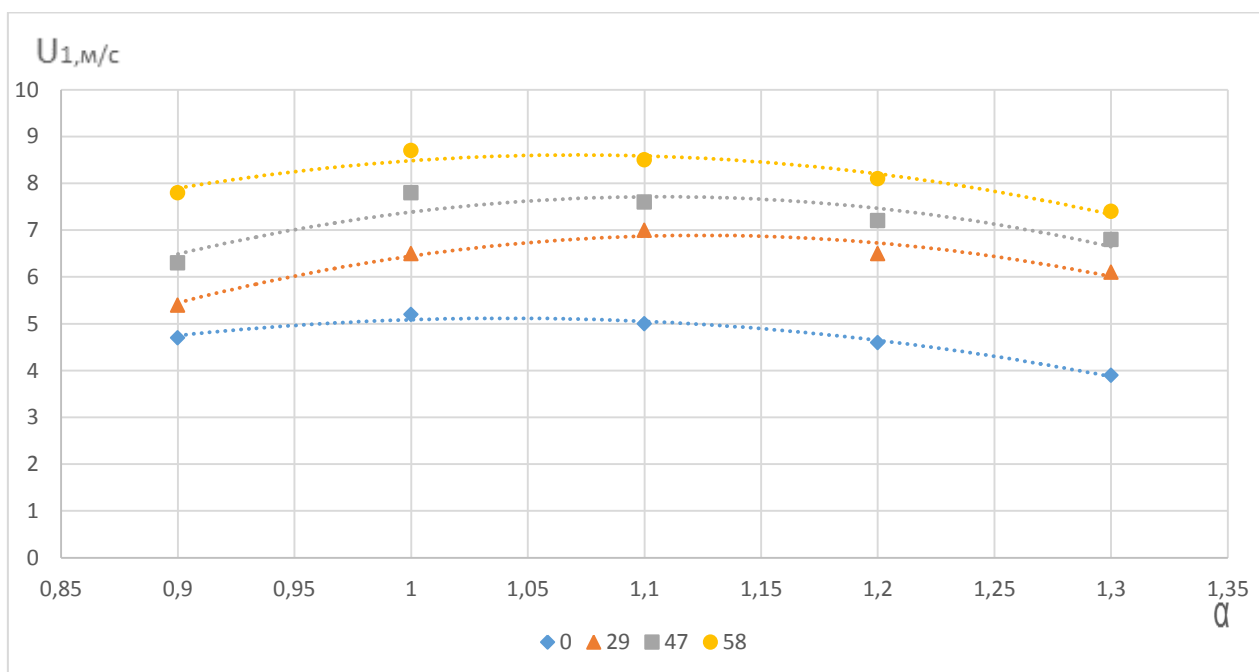


Рисунок 3.6 – Первая фаза сгорания Зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода ( $n_{КВД} = 900$  об/мин), где  $r_{H_2}=0\%$ : ◇;  $r_{H_2}=29\%$ : △;  $r_{H_2}=47\%$ : □;  $r_{H_2}=58\%$ : ○

Здесь мы получили зависимость средней скорости распространения фронта пламени при 900об/мин в первой фазе сгорания при различных добавках водорода, таблица Б.2 приложение Б. Анализируя полученные значения, показанные на рисунке 12, замечаем, что для данного скоростного режима, прослеживается повышение средней скорости распространения пламени при различных добавках водорода (29%,47%,58%) в ТВС, и остается квадратичный закон связи скорости от стехиометрического коэффициен-

та, при этом вне зависимости от насыщенности водорода, так как и при 600об/мин.

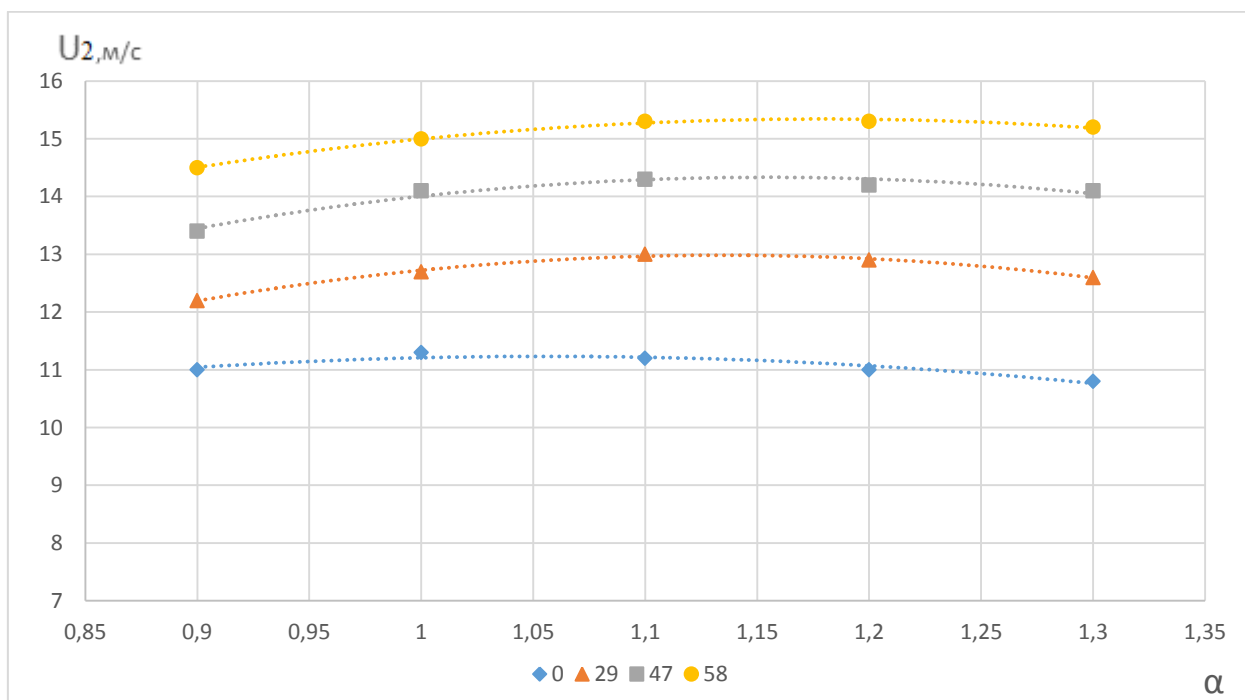


Рисунок 3.7 – Вторая фаза сгорания, зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода ( $n_{КВД} = 600$  об/мин), где  $\diamond$  –  $r_{H_2} = 0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2} = 29\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2} = 47\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2} = 58\%$

Мы получили график, на котором изображен фронт скорости пламени во второй фазе сгорания при различных добавках водорода таблица Б.1, приложение 2. Исследуя рисунки 3.5 и 3.7 замечаем, при 600об/мин скорость сгорания в главной фазе показывает большую величину, чем в первой, так происходит и с добавкой водорода и без нее.

Ввиду того, что, при  $\alpha = 1$  во 2-ой фазе сгорания скорость сгорания равняется 11,3 м/с, а в первой фазе она же равна 4,1 м/с.

Для данного скоростного режима, прослеживается повышение средней скорости распространения пламени при различных добавках водорода (29%, 47%, 58%) в ТВС. Заметное соотношение, чем больше добавка водорода, тем быстрее увеличивается скорость сгорания во второй фазе.

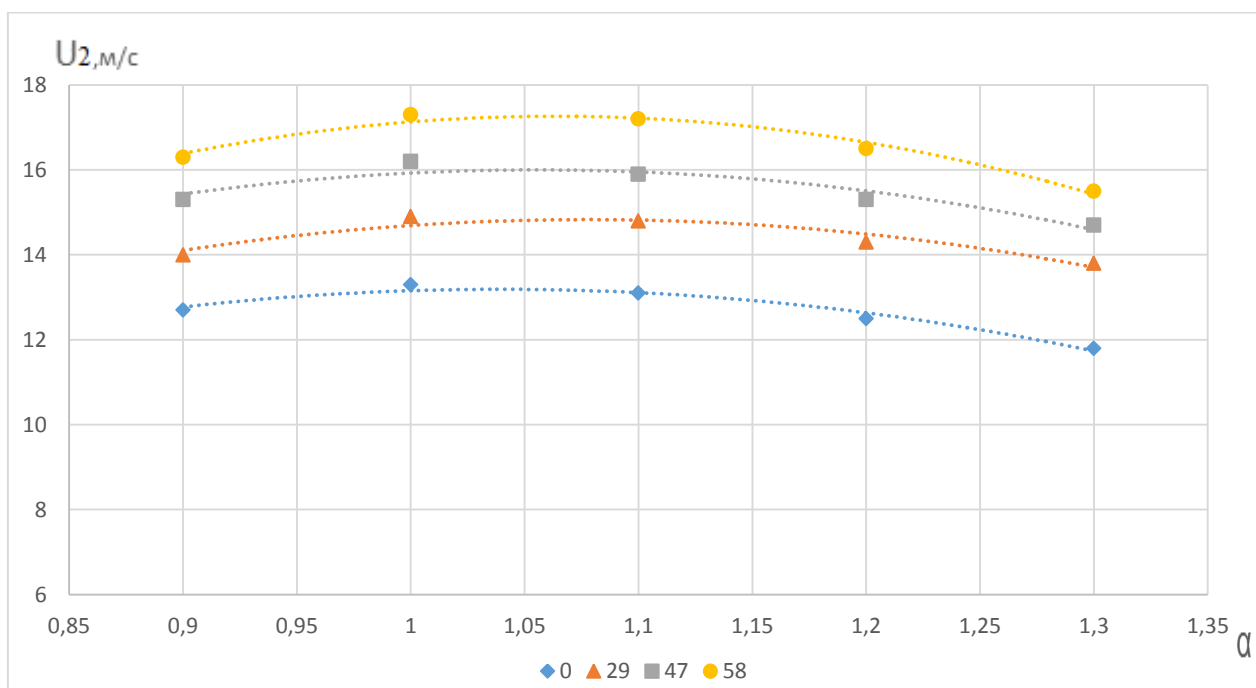


Рисунок 18 – Вторая фаза сгорания, зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода ( $n_{КВД} = 900$  об/мин), где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=29\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=58\%$

Мы получили график 3.8, на котором изображен фронт скорости пламени во второй фазе сгорания при различных добавках водорода и при 900 об/мин таблица Б.2, приложение 2. Анализируя полученные значения замечаем, что для данного скоростного режима, прослеживается повышение средней скорости распространения пламени при различных добавках водорода (29%, 47%, 58%) в ТВС, и остается квадратичный закон связи скорости от стехиометрического коэффициента, при этом вне зависимости от насыщенности водорода, так, как и при 600 об/мин. Как мы уже сказали выше, что скорость во второй фазе сгорания выше, это все потому что температура намного увеличивается и давление мгновенно возрастает.

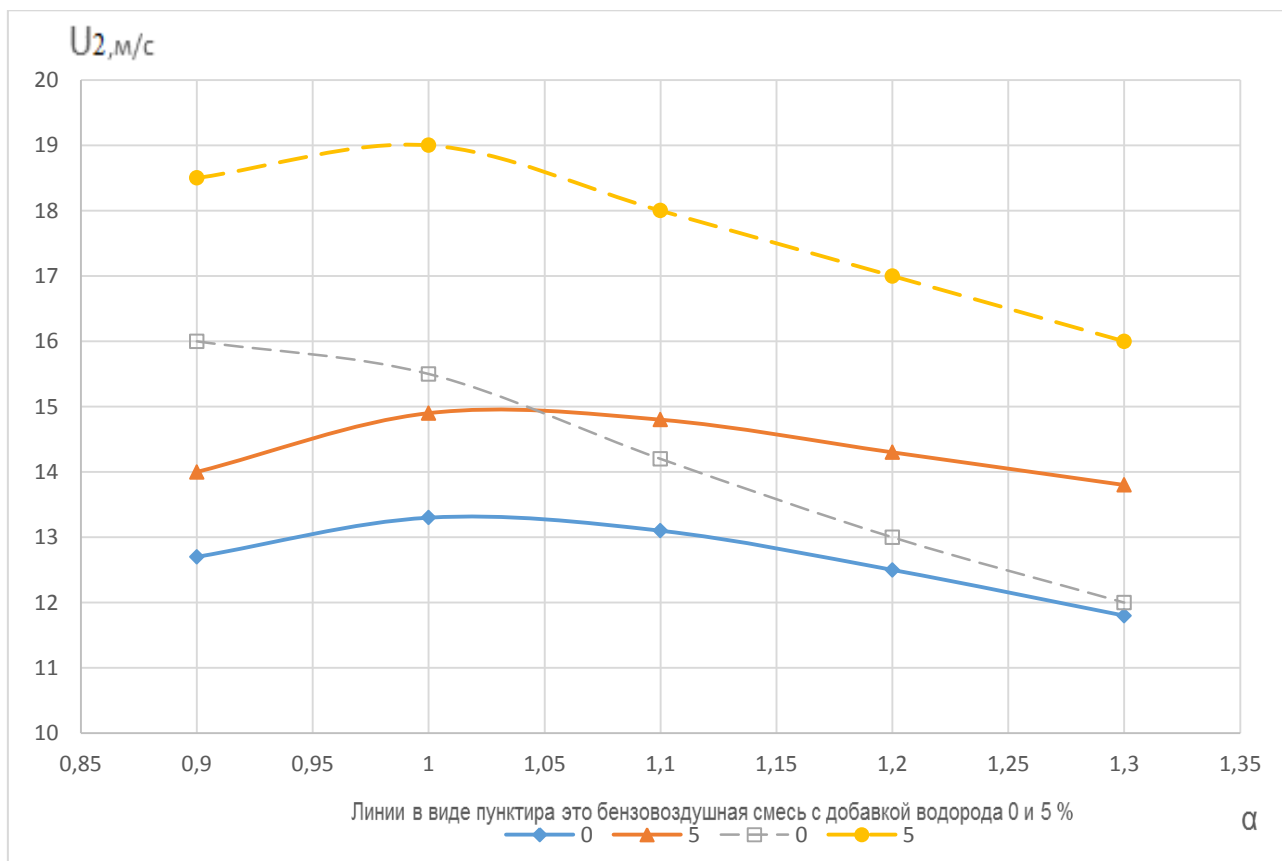


Рисунок 23 – Зависимость средней скорости распространения фронта бензовоздушного и метановодородно-воздушного пламени от коэффициента избытка воздуха ( $n=900$ об/мин) и доли добавляемого водорода в ТВС где  $\diamond - r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta - r_{H_2}=5\%$ ;  $\square - r_{H_2}=0\%$ ;  $\circ - r_{H_2}=5\%$

Мы получили график 3.9, влияние разнородного топлива на среднюю скорость пламени в главной фазе сгорания. Сразу замечаем на рисунке, что, когда используется топливо БВС, скорость выше чем, когда мы используем МВС. Сопоставив на одном графике разные виды топлива, замечаем повышение скорости при добавках водорода. Самый большой прирост скорости прослеживается в зоне бедной консистенции смеси. Делаем небольшие подсчеты и получаем, что при  $\alpha = 1,3$  и доля водорода  $H_2=5\%$ , показала повышение скорости для МВС на 15%, а для БВС на 25%. А при  $\alpha = 1$  примесь  $H_2=5\%$  привела к повышению скорости для МВС лишь на 9%, а для БВС на 16%.

## Глава 4 Обобщение результатов исследования

### 4.1 Изменение зависимости ионного тока в первой и главной фазах сгорания, при оборотах 600 и 900, при добавке водорода.

Определяем по графикам  $\Delta I_1 = I_{900} - I_{600}$  при добавке  $H_2$

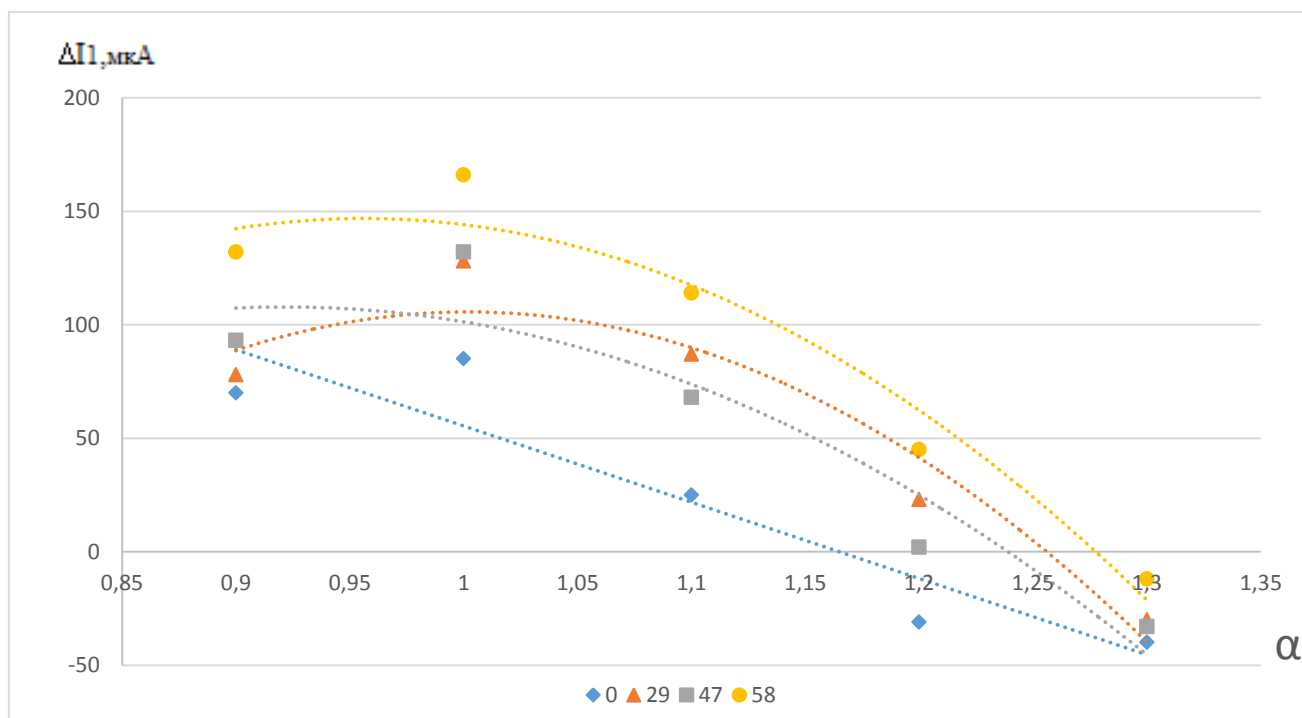


Рисунок 4.1 – Изменение зависимости ионного тока  $\Delta I_1 = I_{900} - I_{600}$  на ИД, расположенном у свечи зажигания от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли водорода в ТВС, где  $\diamond - r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta - r_{H_2}=29\%$ ;  $\square - r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ - r_{H_2}=58\%$

В следствии проделанных изучений, были получены графики изменения зависимостей ионных токов, при работе опытной конструкции в различных высокоскоростных режимах, при различных составах ТВС и добавках водорода. Этот график показывает на сколько вырос ионный ток у свечи зажигания, в связи с повышением оборотов коленчатого вала с 600 до 900 об/мин. Заметное расхождение ионного тока наблюдается при коэффициенте избытка воздуха равной 1, 1.1, то есть при  $\alpha=1$  ионный ток вблизи свечи при

900об/мин, больше на 166мкА, чем при 600об/мин при добавке водорода 58%. Ионный ток при бедных составах смеси ( $\alpha=1.3$ ) с любой добавкой водорода, почти не изменяется и остаётся прежним при 600-ах и 900-ах оборотах, то есть при  $\alpha=1.3$  индукционный датчик показывает на 900об/мин, всего на 12 мкА меньше, чем при 600-ах оборотах.

Определяем  $\Delta I$  1, для  $n=600$  по изменению добавки водорода.

$$\begin{aligned} \Delta I_{29} &= I_{H=29} - I_{H=0} \\ \Delta I_{47} &= I_{H=47} - I_{H=0} \\ \Delta I_{58} &= I_{H=58} - I_{H=0} \end{aligned} \quad (4.1)$$

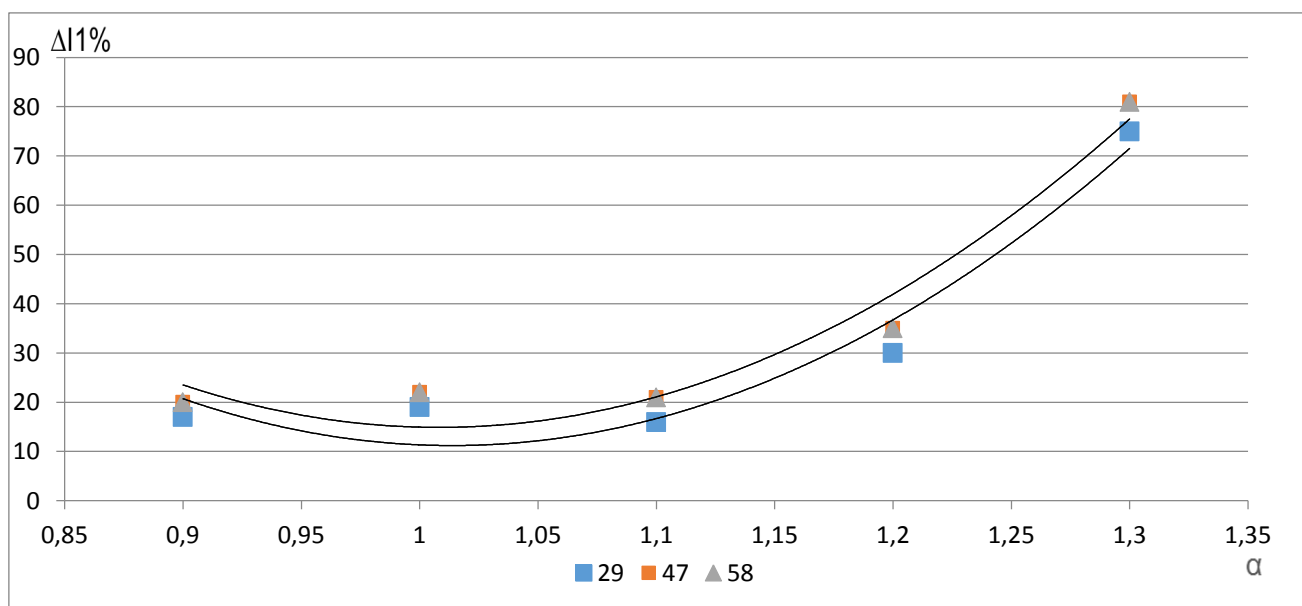


Рисунок 4.2 – Зависимость динамики ионного тока от состава ТВС и объемной доли водорода в ней ( $n_{КВД}=600$  об/мин)  $\Delta I1\%$

Результаты предыдущих графиков показывают динамику ионных токов от состава смеси и добавки водорода в ней. Так как мы уже заметили, что самый пик возрастания ионного тока происходит при добавке водорода в 29%. Более наглядно эта тенденция выражается в 1 фазе сгорания, когда двигатель работает при бедном составе смеси ( $\alpha \geq 1,2$ ). Таким образом процесс, происходящий вблизи свечи зажигания при  $\alpha=1,3$  и  $\gamma_{H_2}=29\%$  поднимает ионный ток на 73% ( $n_{КВД} = 600$  об/мин), а при добавке водорода в  $\gamma_{H_2}=58\%$ , увеличи-



вает ионный ток на 82%. Также мы видим, что при  $\alpha=1$ , и добавке водорода в 29%, увеличение ионного тока происходит на 18%, а при  $r_{H_2}=58\%$ , ионный ток ( $\Delta I$ ) возрастает на 23%. На богатом ТВС ( $\alpha=0.9$ ) происходит такое же увеличение ионного тока, как и на идеальной смеси, когда  $\alpha=1$ , так при  $r_{H_2}=29\%$  ионный ток увеличивается на 16%.

Определяем  $\Delta I$  1, для  $n=900$  по изменению добавки водорода.

$$\Delta I_{29} = I_{H=29} - I_{H=0} \quad (4.2)$$

$$\Delta I_{47} = I_{H=47} - I_{H=0}$$

$$\Delta I_{58} = I_{H=58} - I_{H=0}$$

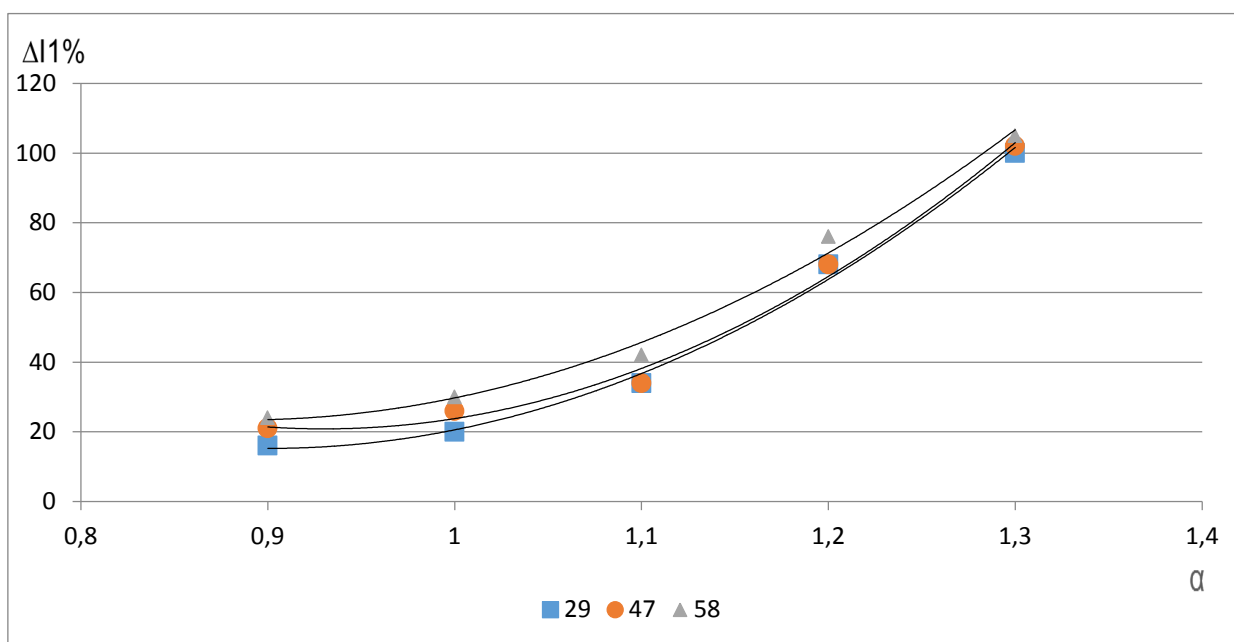


Рисунок 4.3 – Зависимость динамики ионного тока от состава ТВС и объемной доли водорода в ней, где для  $n_{квд}=900$  об/мин:  $\Delta I1\%$ .

Как мы уже заметили ранее, что при 900об/мин ионный ток даже без добавки водорода выше, чем при 600об/мин, и мы видели, что самый пик возрастания ионного тока происходит при добавке водорода в 29%. Таким образом двигатель работающий на бедном составе ( $\alpha \geq 1,2$ ) при  $\alpha=1,3$ , дает при-

рост ионного тока на 102%, это при 900 об/мин, а при максимальной добавке водорода, которая была 58%, дает прирост ионного тока на 105%

Таким образом, при добавке в 29% водорода, двигатель работающий при 900об/мин и при бедном составе смеси ( $\alpha \geq 1,2$ ) увеличивает ионный ток на 102% ( $n_{КВД} = 900$  об/мин), а при добавке водорода в  $r_{H_2}=58\%$ , увеличивает ионный ток на 105%. Еще мы можем заметить из полученного рисунка, что при стехиометрии смеси, когда  $\alpha=1$ , и добавке водорода в 29%, увеличение ионного тока происходит на 21%, а при максимум добавке водорода в нашем случае  $r_{H_2}=58\%$ , ионный ток ( $\Delta I_1$ ) уходит в большую величину на 26%. На более богатом ТВС( $\alpha=0.9$ ) при минимальной добавке  $r_{H_2}=29\%$  получается не очень большое увеличение ионного тока, он поднимается на 17%, а при добавке водорода в 58%, увеличивается на 21%.

Определяем по графикам  $\Delta I_2 = I_{900} - I_{600}$  при добавке  $H_2$

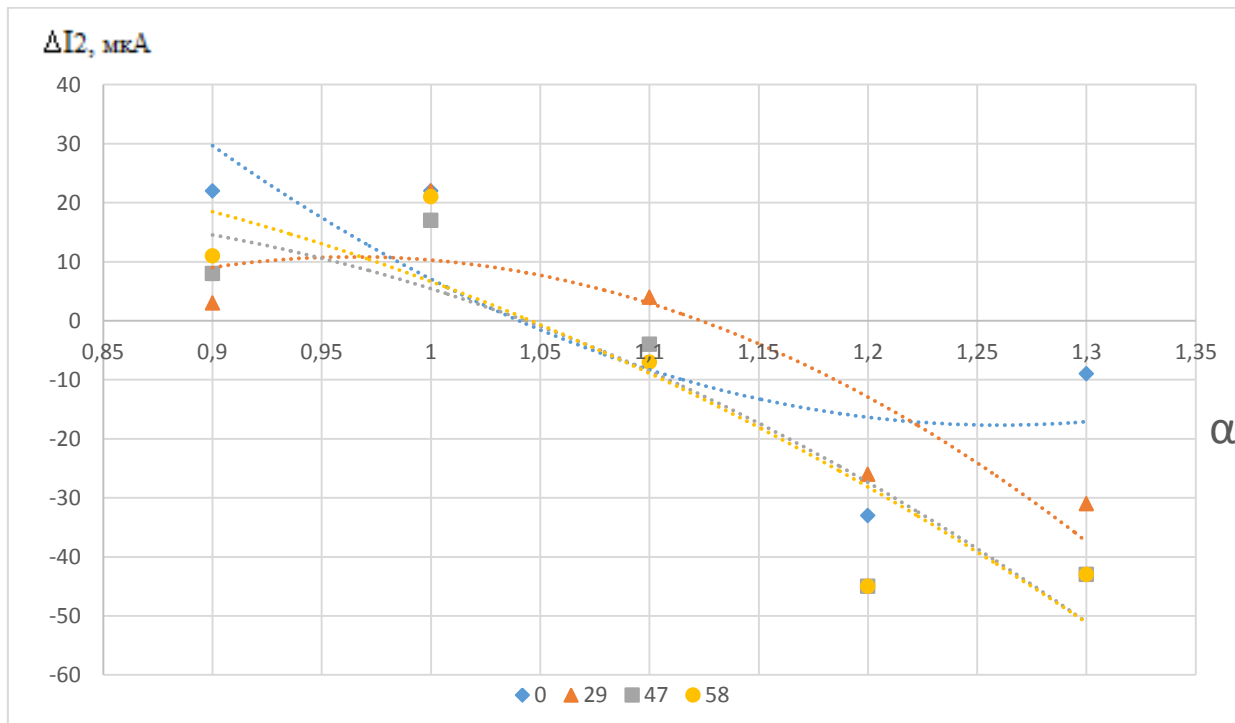


Рисунок 4.4 – Изменение зависимости ионного тока  $\Delta I_2 = I_{900} - I_{600}$  на ИД, удаленном от свечи зажигания от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли водорода в ТВС, где  $\diamond - r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta - r_{H_2}=29\%$ ;  $\square - r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ - r_{H_2}=58\%$ .

В результате полученных сведений были сделаны зависимости ионного тока при работе опытной конструкции в различных высокоскоростных режимах, при различных составах ТВС и добавках водорода. Результаты измерений показывают на сколько вырос ионный ток на удаленном расстоянии от свечи зажигания, в связи с повышением оборотов коленчатого вала с 600 до 900 об/мин. Было замечено расхождение ионного тока, которое наблюдается при коэффициенте избытка воздуха равной 1, 1.2, 1.3, то есть при 900об/мин и при  $\alpha=1$  индукционный датчик удаленный от свечи зажигания показывает ионный ток, больше на 22мкА, чем при 600об/мин при добавке водорода 58%. Ионный ток при  $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин и при бедных составах смеси ( $\alpha=1.2, 1.3$ ) с добавкой водорода  $r_{\text{H}_2}=58\%$ , меньше примерно на 45мкА чем при  $n_{\text{КВД}}=600$  об/мин.

Определяем  $\Delta I$  2, для  $n=600$  об/мин по изменению добавки водорода.

$$\begin{aligned} \Delta I_{29} &= I_{\text{H}=29} - I_{\text{H}=0} \\ \Delta I_{47} &= I_{\text{H}=47} - I_{\text{H}=0} \\ \Delta I_{58} &= I_{\text{H}=58} - I_{\text{H}=0} \end{aligned} \tag{4.3}$$

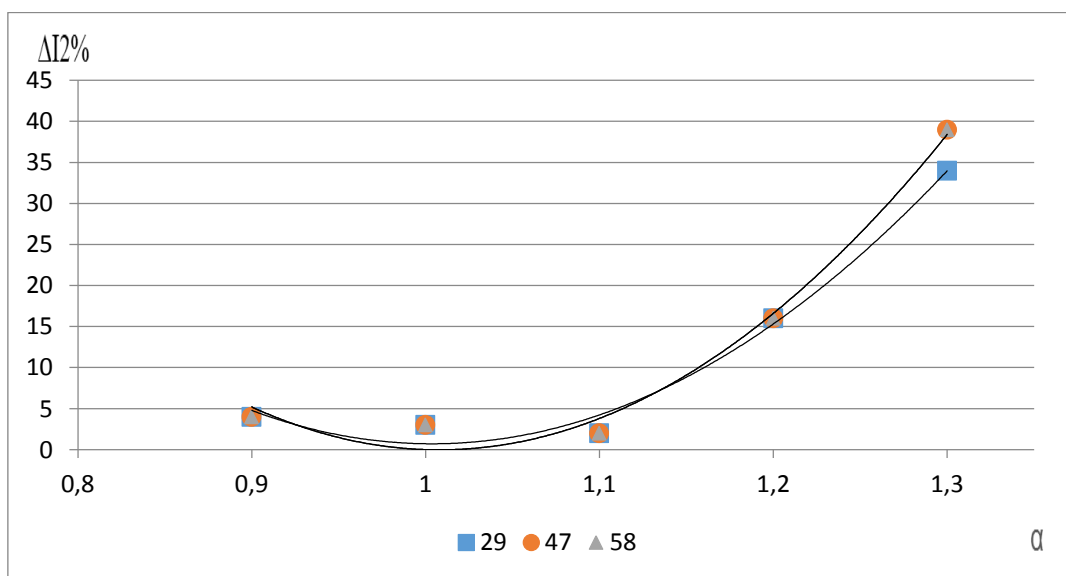


Рисунок 4.5 – Зависимость динамики ионного тока от состава ТВС и объемной доли водорода в ней ( $n_{\text{КВД}}=600$  об/мин)  $\Delta I2\%$

Как мы уже видели, датчик расположенный у свечи зажигания показывал нам быстрое увеличение ионного тока при добавке водорода в 29% при 600об/мин и 900об/мин. Таким образом, ИД расположенный вдали от свечи зажигания при  $r_{H_2}=29\%$  и при 600об/мин, когда состав смеси равнялся  $\alpha = 1,3$ , показывал ионный ток, который увеличился на 34%, а при добавке водорода в  $r_{H_2}=58\%$  ИТ увеличивался на 39%. Также, мы успели заметить, что любая добавка водорода не помогает увеличить ионный ток, при  $\alpha=0.9-1.1$ , увеличение ионного тока не превышает примерно 5%, так, например, ионный ток ( $\Delta I_1$ ) при  $\alpha = 1$  и при  $r_{H_2}=58\%$  возрастает всего на 4%. На богатом ТВС ( $\alpha=0.85-0.95$ ) при  $r_{H_2}=58\%$  происходит небольшое увеличение ионного тока, он поднимается на 5%.

Определяем  $\Delta I_2$ , для  $n=900$  по изменению добавки водорода.

$$\Delta I_{29} = I_{H=29} - I_{H=0}$$

$$\Delta I_{47} = I_{H=47} - I_{H=0} \quad (4.4)$$

$$\Delta I_{58} = I_{H=58} - I_{H=0}$$

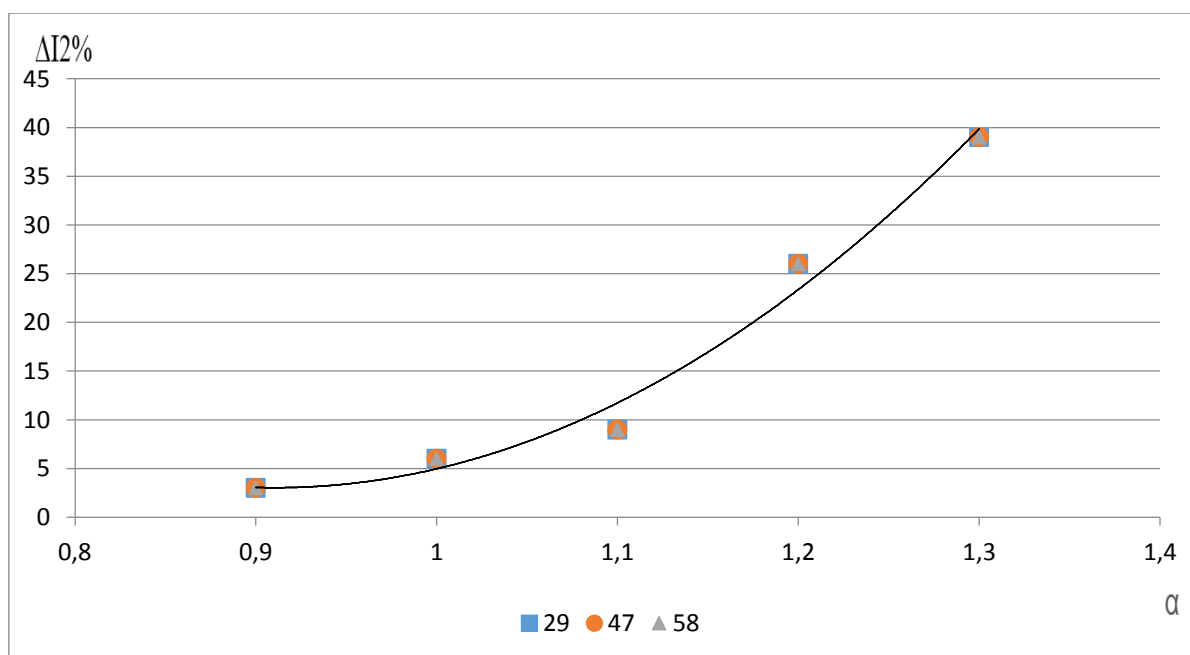


Рисунок 4.6 – Зависимость динамики ионного тока от состава ТВС и объемной доли водорода в ней, где для  $n_{КВД}=900$  об/мин:  $\Delta I_2\%$ .

При  $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин происходит нечто подобное, как и при  $n_{\text{КВД}}=600$  об/мин, ИД расположенный вдали от свечи зажигания при  $r_{\text{H}_2}=29\%$  и при 900 об/мин, когда состав смеси равнялся  $\alpha = 1,3$ , показывал ионный ток, который увеличился 39%, а при добавке водорода в  $r_{\text{H}_2}=58\%$  ИТ увеличивался также на 39%. Можно сделать вывод, что при разных оборотах и при одинаковой добавке водорода, ионный ток увеличивается быстрее, на более повышенных оборотах. Также, мы успели заметить, что любая добавка водорода не помогает резко и намного увеличить ионный ток, при  $\alpha=0.9-1.0$ , так, например, ионный ток ( $\Delta I$ ) при  $\alpha = 1$  и при  $r_{\text{H}_2}=58\%$  возрастает всего на 6%. На богатом ТВС ( $\alpha=0.85-0.95$ ) при  $r_{\text{H}_2}=58\%$  происходит увеличение ионного тока, он поднимается на 3%.

#### **4.2 Изменение зависимости скорости распространения пламени в первой и главной фазах сгорания, при оборотах 600 и 900, при добавке водорода.**

Подобным способом, характер модификации тока на ИД, находящийся у свечи зажигания и на наибольшем удалении от нее, отображает воздействие состава ТВС, доли водорода в ней и первоначальной турбулентности заряда (высокоскоростного режима) на свойства процесса сгорания, значит и, на насыщенность протекания химических взаимодействий горения во фронте пламени. В первой фазе сгорания ТВС эта тенденция проявляется гораздо лучше.

Определяем зависимость скорости распространения пламени

$$\Delta U_1 = U_{900} - U_{600} \quad (4.5)$$

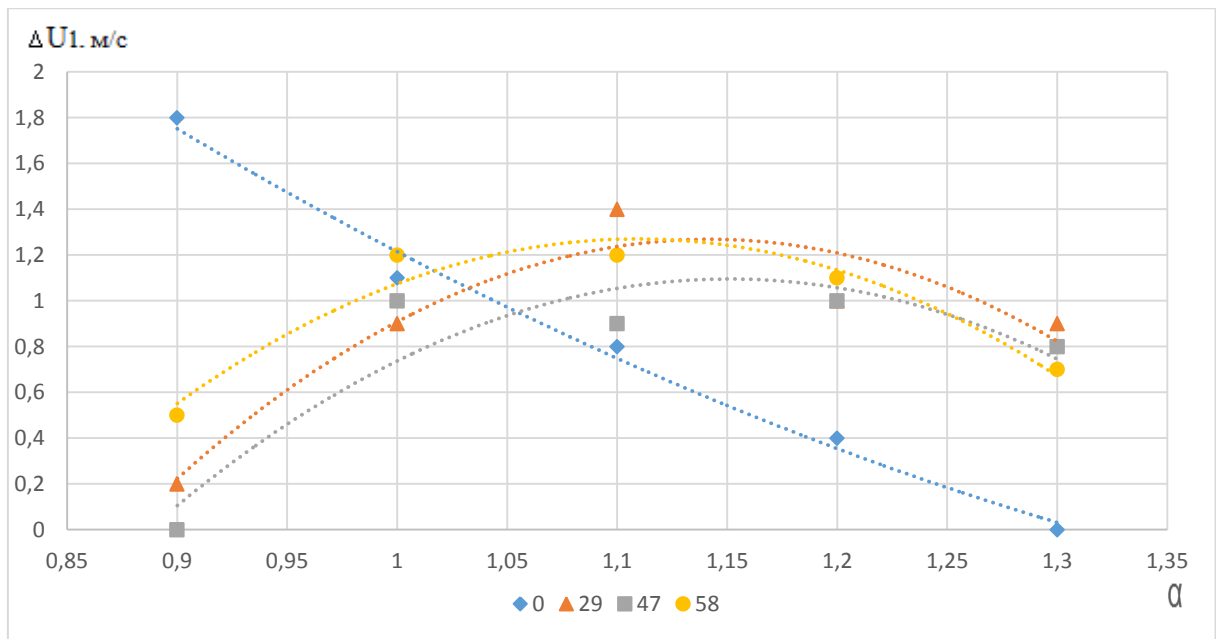


Рисунок 4.7 – Изменение зависимости средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени  $\Delta U_1 = U_{900} - U_{600}$  на ИД, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли добавляемого водорода в ТВС, где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=29\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=58\%$

Из рисунка 4.7 более чем заметно, то что скорость выше, на 900об/мин чем на 600об/мин КВД, чем богаче смесь.

Опытным путем найдено, то что, когда происходит прирост частоты вращения КВД, в этот момент тоже происходит увеличение скорости горения в 1-ой фазе.

При стехиометрии смеси, происходит прирост скорости в 1-ой фазе горения, и она увеличивается на 1.1м/с, а при более обедненной смеси скорость ведет себя по-другому и повышается не на много, на 0.3 м/с, из этого следует вывод, что насыщенность прироста скорости уменьшается, при увеличении  $\alpha$ .

При интенсивном и быстром обеднении смеси, понижение скорости сгорания, никак не восполняется приростом турбулентности.

Прирост скорости фронта пламени при различных долях водорода с увеличением оборотов мы так же замечаем, по полученным результатам при

$\alpha=1$  и при  $\gamma_{H_2}=58\%$  скорость  $U_1$  повысилась на 1.2 м/с, а при  $\alpha=1$  и при  $\gamma_{H_2}=58\%$  скорость  $U_1$  увеличилась на 0.9 м/с.

Определяем  $\Delta U_1$ , для  $n=600$  по изменению добавки водорода.

$$\Delta U_{29}=U_{H=29}-U_{H=0}$$

$$\Delta U_{47}=U_{H=47}-U_{H=0} \quad (4.6)$$

$$\Delta U_{58}=U_{H=58}-U_{H=0}$$

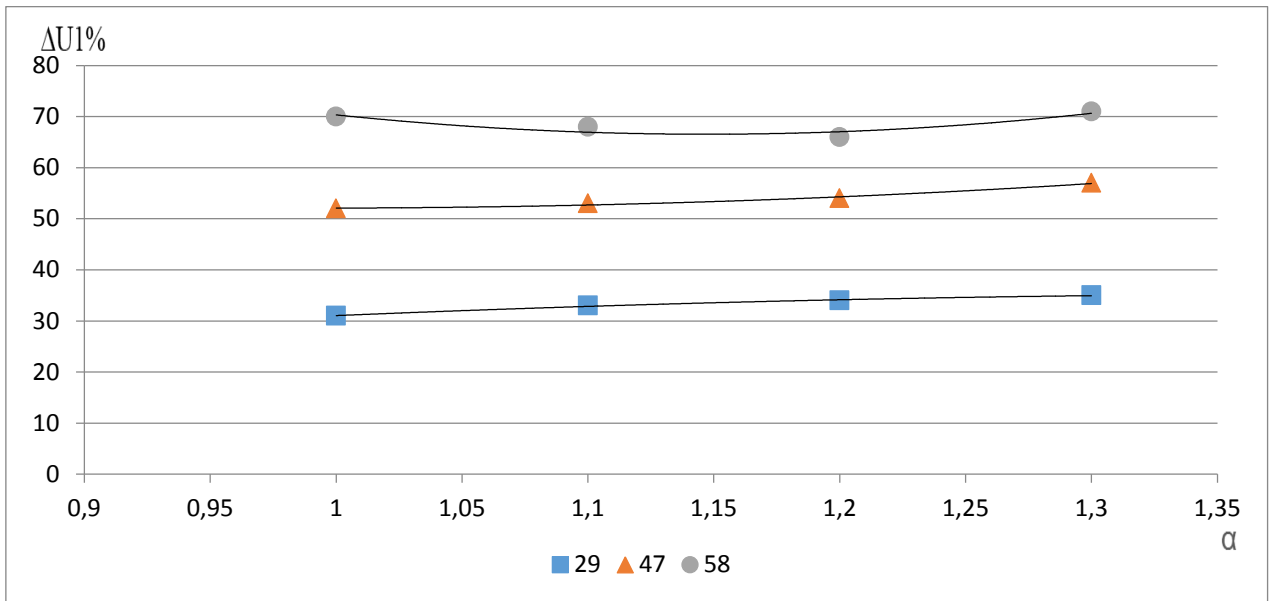


Рисунок 4.8 – Зависимость динамики скорости распространения пламени от состава ТВС и объемной доли водорода ( $n_{КВД}=600$  об/мин)  $\Delta U_1\%$

На графике, мы получили, зависимость динамики скорости фронта пламени от ТВС при  $n_{КВД}=600$  об/мин. Заметен рост скорости распространения пламени при добавлении доли водорода в метановоздушную смесь сравнительно скорости распространения пламени без  $\gamma_{H_2}$ .

Таким образом, в 1 фазе сгорания при  $\alpha=1$  и добавке водорода  $\gamma_{H_2}=29\%$  скорость сгорания увеличивается на 31%, а при добавке водорода  $\gamma_{H_2}=58\%$ , скорость возрастает аж до 71%. Рассмотрим теперь состав ТВС  $\alpha=1.3$ , замечаем, что при 29%добавки водорода скорость пламени возрастает на 35%, а при  $\gamma_{H_2}=58\%$ , увеличивается на 72%. Анализируя полученные сведения, можно

заметить, что при 600об/мин, увеличение скорости в первой фазе сгорания, при различных добавках водорода, не зависит от состава смеси и возрастает примерно одинаково.

Определяем  $\Delta U$  1, для  $n=900$  по изменению добавки водорода.

$$\begin{aligned}\Delta U_{29} &= U_{H=29} - U_{H=0} \\ \Delta U_{47} &= U_{H=47} - U_{H=0} \\ \Delta U_{58} &= U_{H=58} - U_{H=0}\end{aligned}\tag{4.7}$$

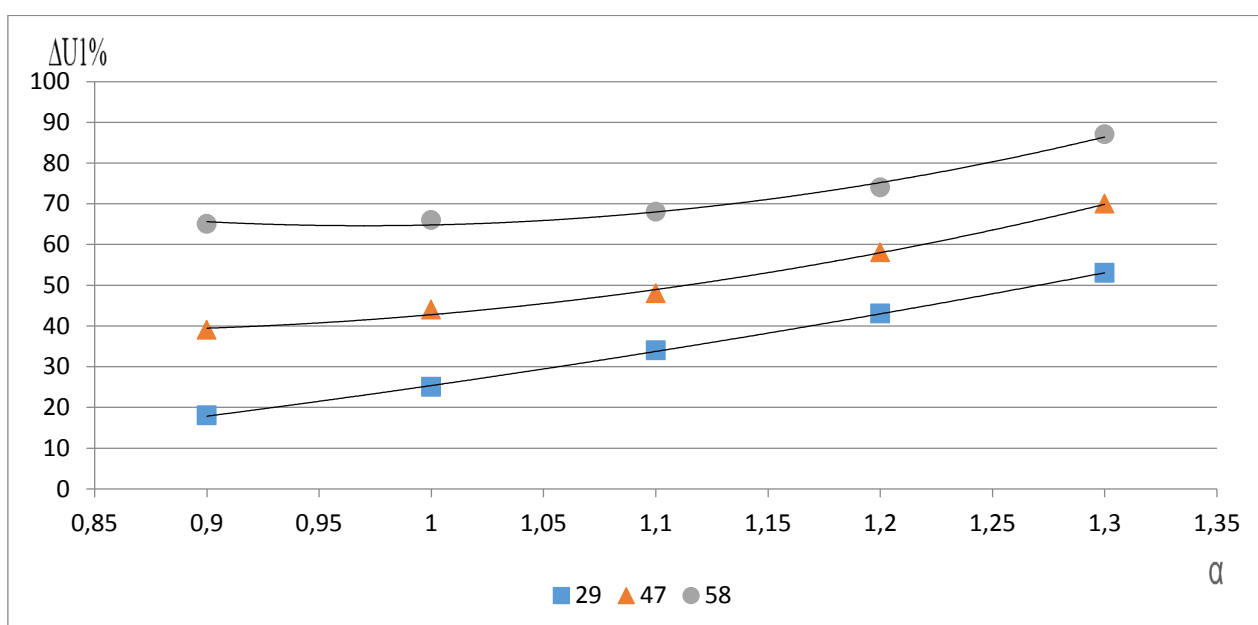


Рисунок 4.9 – Зависимость динамики скорости распространения пламени от состава ТВС и объемной доли водорода ( $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин)  $\Delta U1\%$

На рисунке 4.9, мы получили, зависимость динамики скорости фронта пламени от ТВС при  $n_{\text{КВД}}=900$  об/мин. Здесь так же, как и при 600об/мин заметен рост скорости распространения пламени при добавлении доли водорода в метановоздушную смесь сравнительно скорости распространения пламени без  $r_{H_2}$ .

Таким образом, в 1 фазе сгорания при  $\alpha=1$  и добавке водорода  $r_{H_2}=29\%$  скорость сгорания увеличивается на 24%, а при добавке водорода  $r_{H_2}=58\%$ ,



скорость возрастает аж до 68%. Рассмотрим теперь состав ТВС  $\alpha=1.3$ , замечаем, что при 29%добавки водорода скорость пламени возрастает на 52%, а при  $r_{H_2}=58\%$ , скорость увеличивается на 88%. Выявлено, то что максимальное увеличение скорости прослеживается в 1 фазе сгорания. При этом, чем водорода будет больше и смесь будет более обедненная, тем быстрее скорость будет увеличиваться. Определенная зависимость замечена при 900об/мин.

Определяем зависимость относительной скорости распространения пламени в первой фазе сгорания

$$\Delta U_1 = U_{900} / U_{600} \quad (4.8)$$

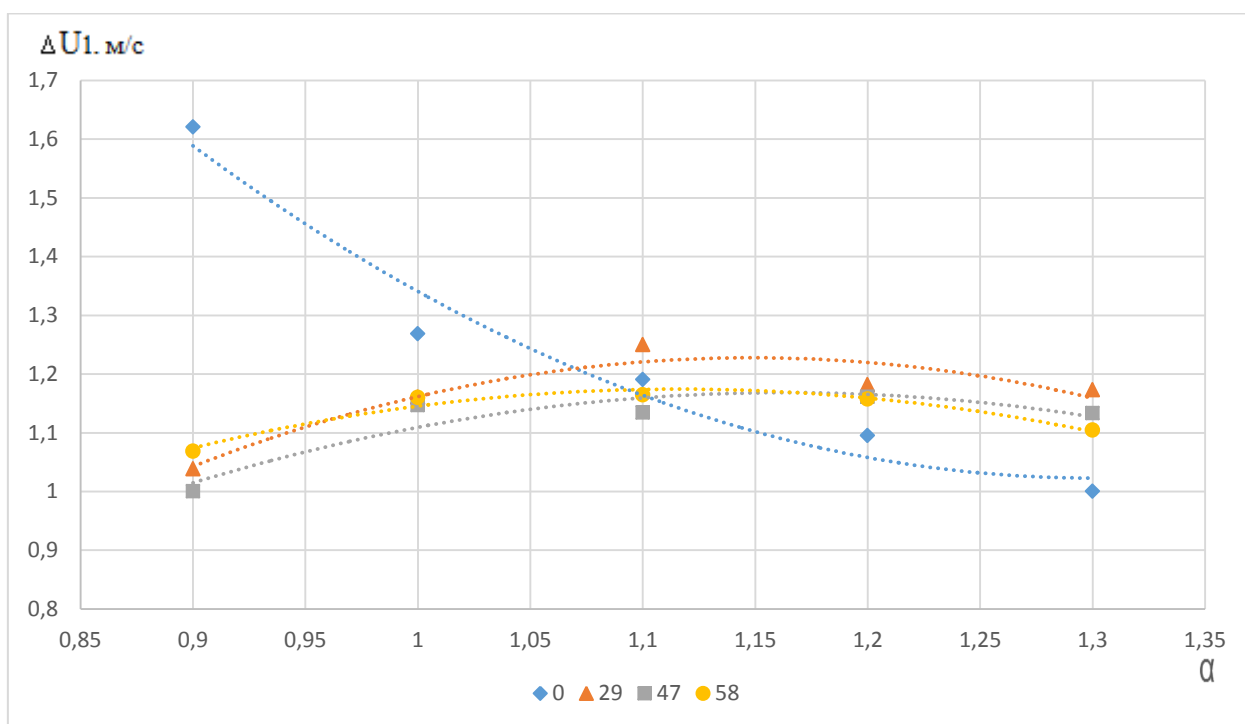


Рисунок 4.10 – Относительные величины зависимости средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени  $\Delta U_1 = U_{900} / U_{600}$  на ИД, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли добавляемого водорода в ТВС, где  $\diamond - r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta - r_{H_2}=29\%$ ;  $\square - r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ - r_{H_2}=58\%$

Анализируя сведения, полученные из рисунков 3.5 и 3.6 мы получаем относительные величины скоростей сгорания в первой фазе, при разных до-

бавках водорода и от коэффициента  $\alpha$ . Опытным путем найдено, что скорость сгорания в 1-ой фазе зависит от горения в другой фазе, и в данном моменте остается линейная взаимозависимость, невзирая, на другие факторы. Подобным способом, подсчет скорости распространения пламени в 1 фазе сгорания при 600 об/мин даст приблизительную возможность предсказать формирование скорости при 900 об/мин.

Теперь находим зависимость режимов средней скорости распространения пламени во 2-ой фазе.

$$\Delta U_2 = U_{900} - U_{600} \quad (4.9)$$

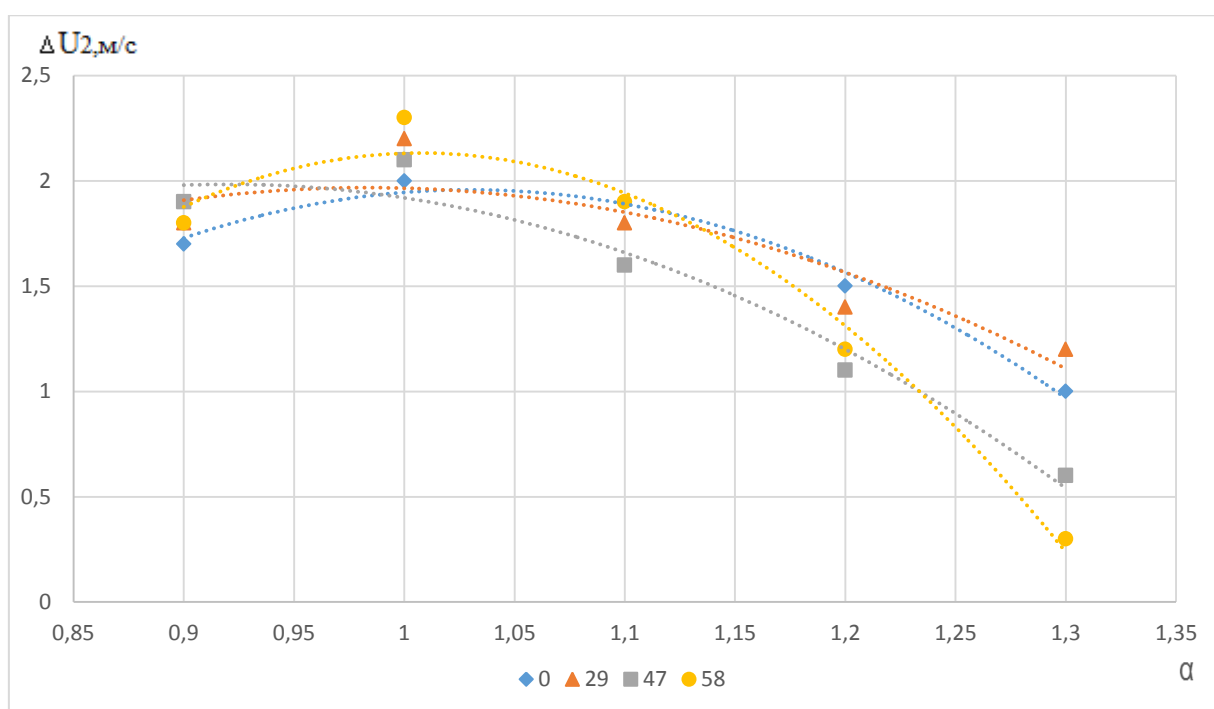


Рисунок 4.11 – Изменение зависимости средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени  $\Delta U_2 = U_{900} - U_{600}$  на ИД, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли добавляемого водорода в ТВС, где  $\diamond - r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta - r_{H_2}=29\%$ ;  $\square - r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ - r_{H_2}=58\%$

Анализируя график полученных изменений оборотов от скорости фронта пламени в главной фазе сгорания, делаем вывод, что скорость горения меняется с повышением частоты вращения КВД с 600 вплоть до 900 об/мин. Получаем, при коэффициенте избытка воздуха равном

$\alpha=1$  увеличение скорости в 2-ой фазе сгорания ( $U_2$ ) без добавки водорода составила 2 м/с, а при  $\alpha=1,3$  повышение скорости равняется 1 м/с. Насыщенность возрастания скорости сгорания уменьшается, значит ТВС становится беднее.

Это все обуславливает, то что прирост турбулентности прекращается и не восполняется при многочисленном объединении ТВС. Скорость так же увеличивается и при добавках водорода, например, при  $\alpha=1$  и при  $\gamma_{H_2}=58\%$ . скорость сгорания на 900об/мин выше на 2.4 м/с, чем на 600б/мин.

Когда возрастает частота вращения КВД, тогда увеличиваются вихревые движения смеси в КС и возрастает скорость движения топливоздушной смеси. Определяем  $\Delta U_2$ , для  $n=600$  по изменению добавки водорода.

$$\begin{aligned} \Delta U_{29} &= U_{H=29} - U_{H=0} \\ \Delta U_{47} &= U_{H=47} - U_{H=0} \\ \Delta U_{58} &= U_{H=58} - U_{H=0} \end{aligned} \quad (4.10)$$

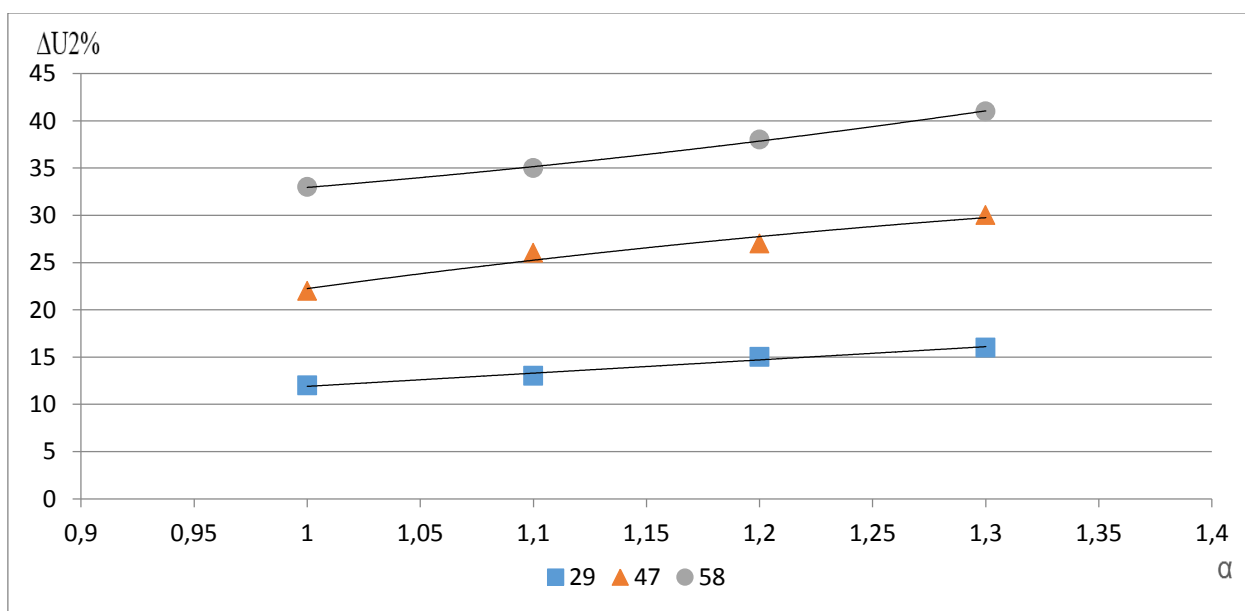


Рисунок 4.12 – Зависимость динамики скорости распространения пламени от состава ТВС и объемной доли водорода ( $n_{КВД}=600$  об/мин)  $\Delta U_2\%$

Анализируя рисунок 4.12, замечаем, что рост скорости распространения пламени, при добавлении доли водорода происходит по линейному закону. Таким образом, в 2 фазе сгорания при  $\alpha=1$  и добавке водорода  $\gamma_{H_2}=29\%$  скорость сгорания увеличивается на 13%, а при добавке водорода  $\gamma_{H_2}=58\%$ , скорость возрастает до 33%. Рассмотрим теперь состав ТВС  $\alpha=1.3$ , замечаем, что при 29% добавке водорода, скорость пламени возрастает на 16%, а при  $\gamma_{H_2}=58\%$ , увеличивается на 42%. Анализируя полученные сведения, можно заметить, что при 600об/мин, увеличение скорости в основной фазе сгорания, при различных добавках водорода, прямолинейно зависит от состава смеси.

Определяем  $\Delta U$  2, для  $n=900$  по изменению добавки водорода.

$$\begin{aligned} \Delta U_{29} &= U_{H=29} - U_{H=0} \\ \Delta U_{47} &= U_{H=47} - U_{H=0} \\ \Delta U_{58} &= U_{H=58} - U_{H=0} \end{aligned} \quad (4.11)$$

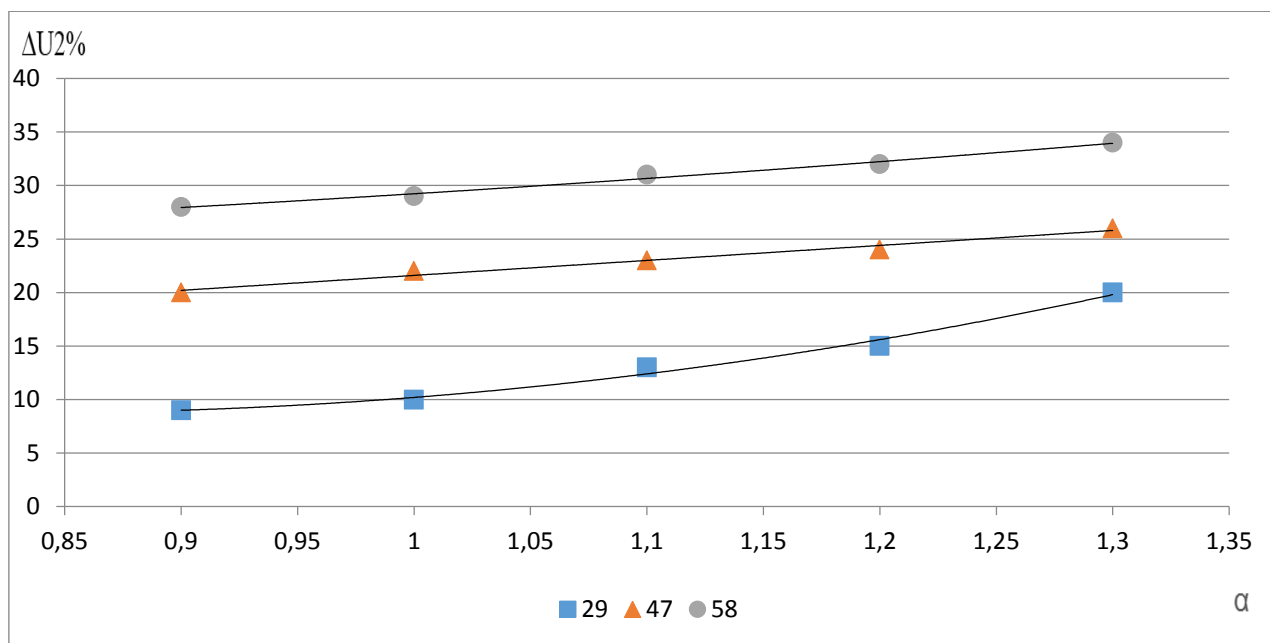


Рисунок 4.13 – Зависимость динамики скорости распространения пламени от состава ТВС и объемной доли водорода ( $n_{КВД}=900$  об/мин)  $\Delta U_{2\%}$

На рисунке 4.13, мы получили, зависимость динамики скорости фронта пламени от ТВС при  $n_{квд}=900$  об/мин. Здесь так же, как и при 600 об/мин заметен рост скорости распространения пламени при добавлении доли водорода в метановоздушную смесь сравнительно скорости распространения пламени без  $r_{H_2}$ .

Таким образом, в 2 фазе сгорания при  $\alpha=1$  и добавке водорода  $r_{H_2}=29\%$  скорость сгорания увеличивается на 10%, а при добавке водорода  $r_{H_2}=58\%$ , скорость возрастает до 29%. Рассмотрим теперь состав ТВС  $\alpha=1.3$ , замечаем, что при 29% добавки водорода скорость пламени возрастает на 20%, а при  $r_{H_2}=58\%$ , скорость увеличивается на 34%.

Выявлено, то что максимальное увеличение скорости прослеживается в 1 фазе сгорания. При этом, чем в смесь ТВС будет добавлено больше водорода и будет беднее смесь, тем сильнее рост скорости. Заметная тенденция увеличения скорости фронта пламени с обеднением смеси. Фактором данному, по-видимому, считается определенный прирост доли водорода в топливной смеси это ведет к тому, что начинается увеличение атомарного водорода, это все представляет собой наравне с иными радикалами особенную консистенцию в реакциях горения

Образуются при помощи присадки водорода быстродействующие центры химионизационных взаимодействий. Энергия сгорания уменьшается и границы сгорания увеличиваются.

Определяем зависимость относительной скорости распространения пламени в второй фазе сгорания

$$\Delta U_2 = U_{900} / U_{600} \quad (4.12)$$

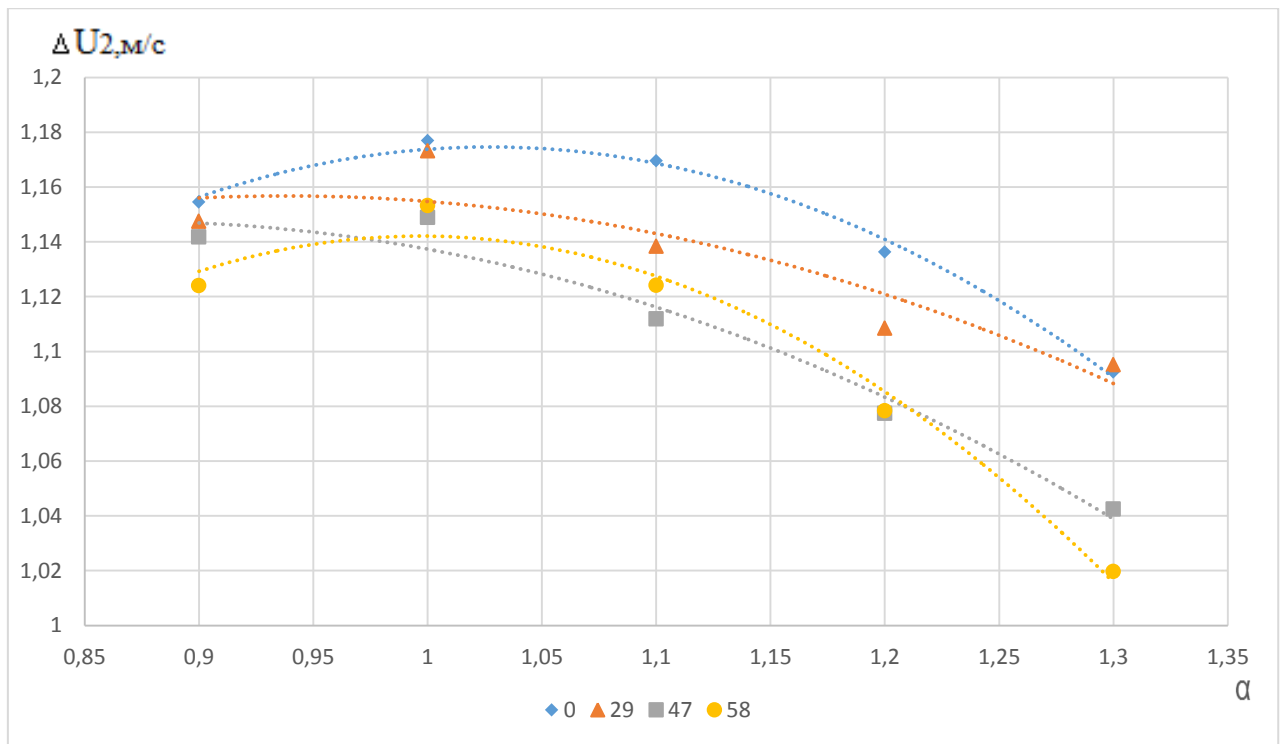


Рисунок 4.14 – Относительные величины зависимости средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени  $\Delta U_2 = U_{900}/U_{600}$  на ИД, от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) и доли добавляемого водорода в ТВС, где  $\diamond - r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta - r_{H_2}=29\%$ ;  $\square - r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ - r_{H_2}=58\%$

Полученные из рисунков 3.7 и 3.8 сведения, из них мы получаем относительные величины скоростей сгорания в основной фазе, при разных добавках водорода и от коэффициента  $\alpha$ .

Заметное падение относительной величины скорости означает, что с обеднением смеси насыщенность скорости сгорания уменьшается. Следует данное, то что при уменьшении или при обеднении смеси сокращается скорость и не возмещается турбулентностью, при максимальной добавке водорода  $r_{H_2}=58\%$ , это более наглядно выражается и при обедненной смеси  $\alpha=1.3$ .

#### 4.3 Зависимости плотности тока и скорости распространения пламени от массовой доли углерода в ТВС, при различных добавках водорода

Выявлен недостаток зависимости плотности ионного тока (для двух скоростных режимов) от сосредоточения водорода, который больше 5%. Ис-

следуя графики было выявлено что в бензоводородновоздушной и в метановодородновоздушной смеси ионизационный ток предопределяется долей углерода и скоростью пламени.

Определяем углеродное число для ТВС с добавкой водорода 0,5,10,15%.

$$G_c = \frac{G_B}{l_6 * G_{T \text{ бенз}} * l_{H_2} * G_{H_2}} \quad (4.13)$$

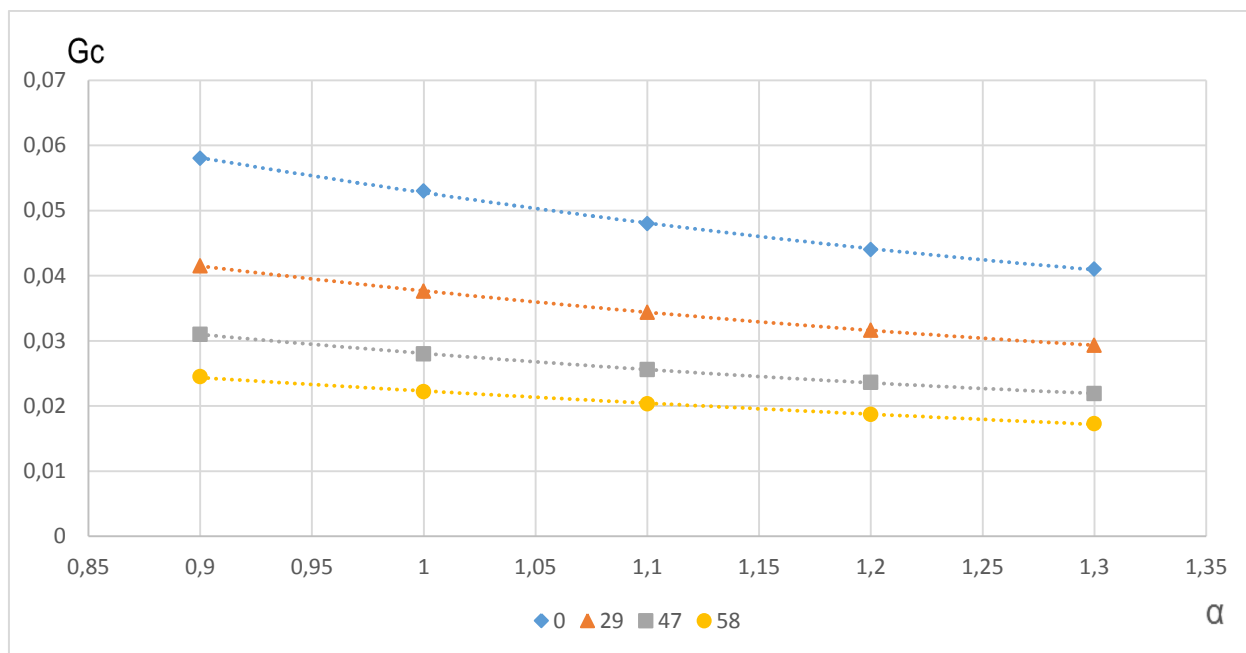


Рисунок 4.15 – Зависимость углеродного числа для ТВС от коэффициента избытка воздуха и доли добавляемого водорода в ТВС, где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=29\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=47\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=58\%$ .

Анализируя рисунок, понимаем, что углеродное число будет уменьшаться с добавкой водорода, и с обеднением смеси.

Итоги проверок свидетельствуют, о том, что углеродное число обладает минимальным значениям при  $\alpha = 1.3$  в момент работы устройства и в отсутствии добавки водорода. Когда мы начинаем добавлять долю водорода в ТВС происходит, тоже самое, углеродное число уменьшается, например, при  $\alpha = 1.0$  и при  $r_{H_2}=29\%$   $G_c=0.41$ , а при  $r_{H_2}=58\%$ , оно равно 0.024, При,  $\alpha = 1.3$  и при  $r_{H_2}=29\%$ ,  $G_c=0.03$ , а при  $r_{H_2}=58\%$ , углеродное число 0.018

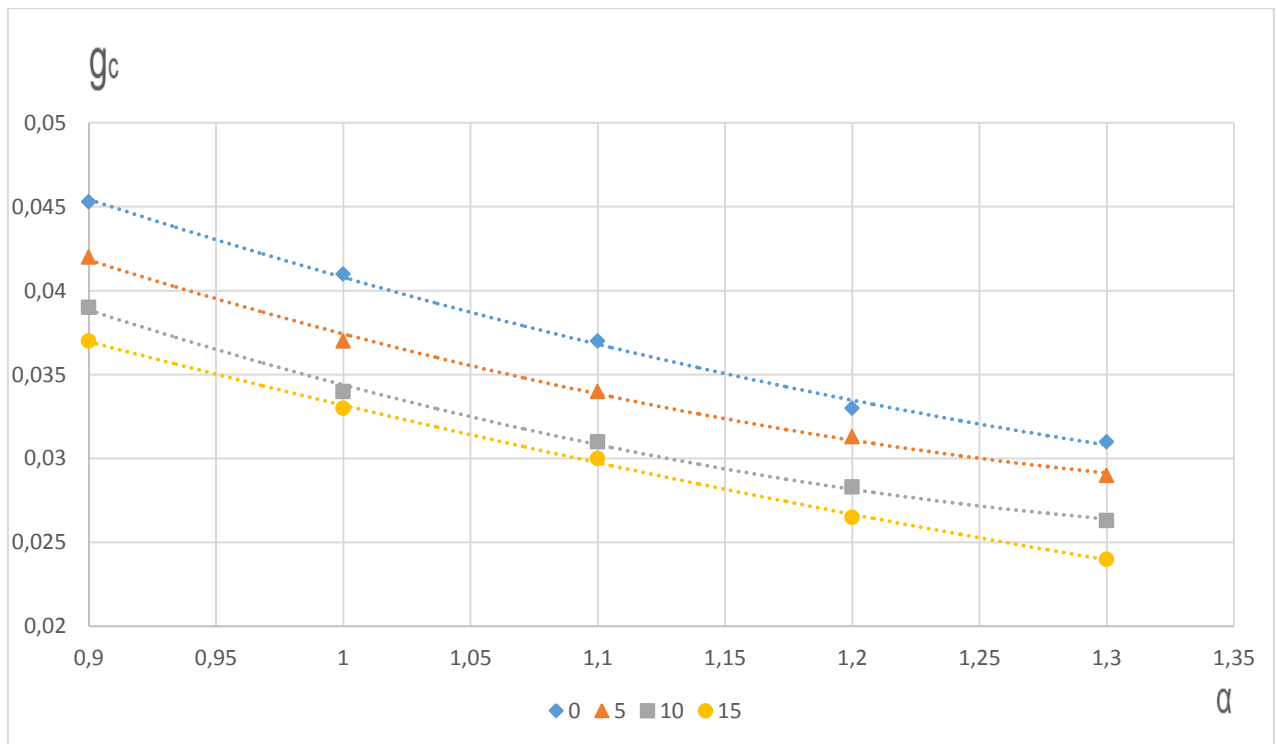


Рисунок 4.16 – Зависимость массовой доли углерода при коэффициенте избытка воздуха от 0,9 до 1,3 для метана и доли добавляемого водорода в ТВС, где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=5\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=10\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=15\%$ .

Анализируя полученные графики по зависимости массовой доли углерода от стехиометрического коэффициента и добавки водорода, замечаем, что при обеднении ТВС сравнительно оптимума, невзирая на сокращение плотности пристенных слоев, массовая доля углерода в ОГ увеличивается. При обогащении ТВС концентрация СН возрастает в следствии, огромной неполноты сгорания горючего и повышения плотности пристенных слоев и заледененных зазоров. Данное совершается из-за ухудшения критерий сгорания (сокращение скоростей сгорания, температуры цикла) и, результат, повышения толщины пристенных слоев. Так при  $\alpha = 1.0$  и при  $r_{H_2}=5\%$   $g_c=0.038$ , а при  $r_{H_2}=15\%$ , массовая доля углерода равна  $g_c=0.033$ . При  $\alpha = 1.3$  и при  $r_{H_2}=5\%$   $g_c=0.032$ , а при  $r_{H_2}=15\%$ , массовая доля углерода равна  $g_c=0.023$ .



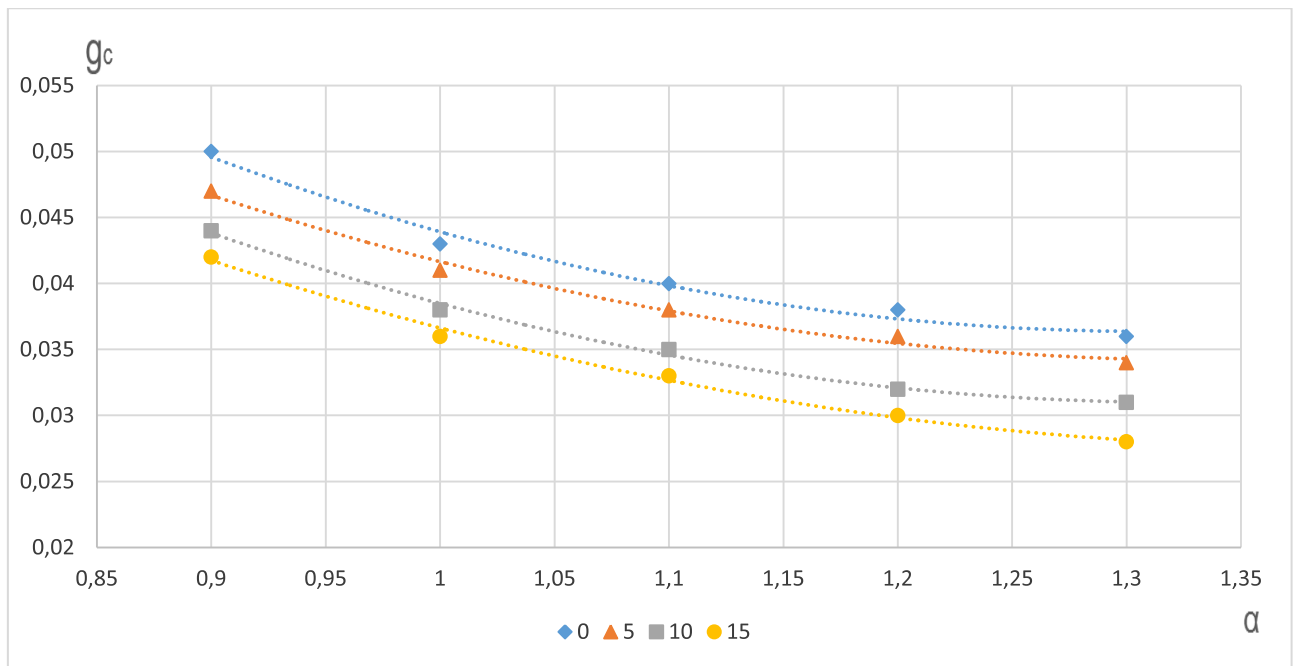


Рисунок 4.17 – Зависимость массовой доли углерода при коэффициенте избытка воздуха от 1 до 1,3 для бензина и доли добавляемого водорода в ТВС, где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=5\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=10\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=15\%$ .

Были получены сведения зависимости массовой доли углерода для бензина от  $\alpha$  и  $r_{H_2}$ . На этом графике мы замечаем, как похожи ведут себя линии массовой доли углерода и метана. Анализируя график замечаем, что с добавкой водорода в бензин массовая доля углерода выше чем с добавкой в метан. Так при  $\alpha = 1.0$  и при  $r_{H_2}=5\%$   $g_c=0.042$ , а при  $r_{H_2}=15\%$ , массовая доля углерода в бензине равна  $g_c=0.036$ . При  $\alpha = 1.3$  и при  $r_{H_2}=5\%$   $g_c=0.034$ , а при  $r_{H_2}=15\%$ , массовая доля углерода равна  $g_c=0.028$ . Представленные ниже формулы ярко отражают массовые доли углерода, водорода и кислорода в МВВС.

$$g_C = \frac{1 - g_{H_2}}{1 + \alpha \cdot [L_{CH_4} \cdot (1 - g_{H_2}) + g_{H_2} \cdot L_{H_2}]} \cdot \frac{\mu_C}{\mu_{CH_4}}, \quad (4.14)$$

где

$L_{CH_4}$  – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг метана ( $L_{CH_4} = 17,28$  кг);

$L_{H_2}$  – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг водорода ( $L_{H_2} = 34,48$  кг);

$g_{H_2}$  – массовая доля водорода в топливной смеси;

$\mu_C$  – атомная масса углерода ( $\mu_C = 12$  г/моль);

$\mu_{CH_4}$  – молекулярная масса метана ( $\mu_{CH_4} = 16$  г/моль);

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

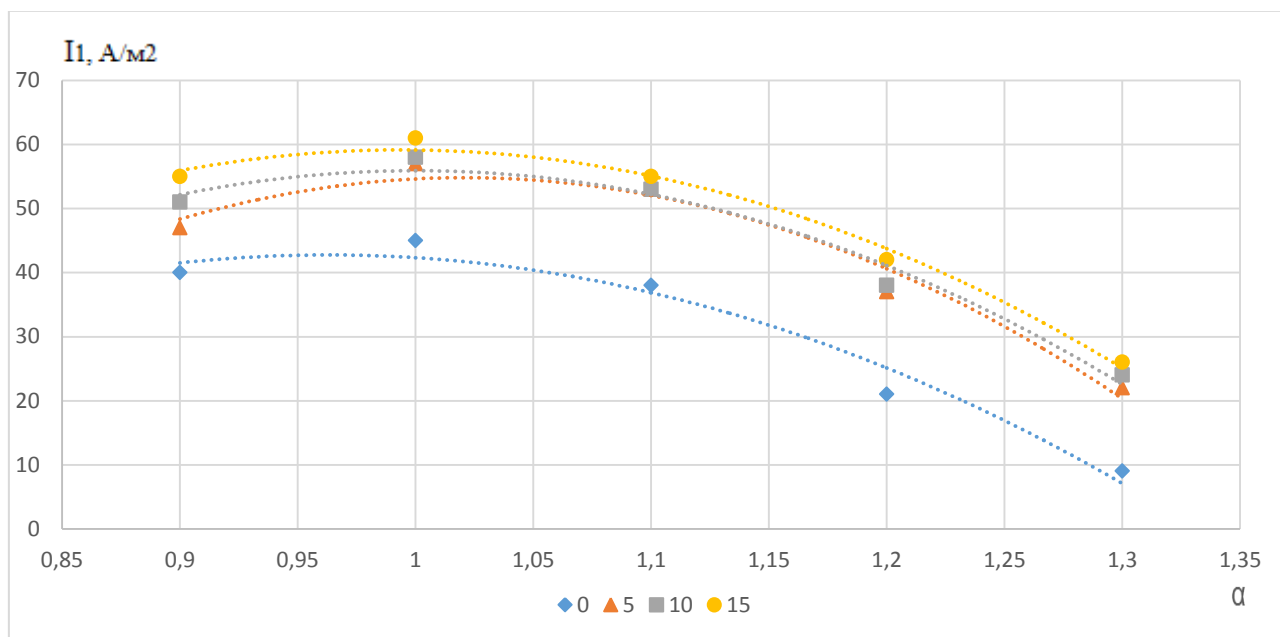


Рисунок 4.18 – Зависимость плотности ионного тока от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в метановоздушную смесь, расположенного в первой фазе сгорания ( $n=900$  об/мин),  $I_i$ , где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=5\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=10\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=15\%$

Воздействие добавок доли водорода на насыщенность ионного тока для метановоздушной смеси, показано на графике для первой фазы сгорания 4.18. Насыщенность ионного тока складывалась из отношения наибольшей величины ионного тока к площади плоскости электрода зонда. Установлено, то что за пределами связи скоростного режима и типа топлива вид модификации амплитуд ионных токов отражает воздействие состава ТВС на свойства движения, распространения пламени. Заметно, то что с

обеднением смеси плотность ионного тока падает, так при  $\alpha = 1.0$  и при  $r_{H_2}=5\%$  плотность равна  $55\text{A}/\text{м}^2$ , а при  $\alpha = 1.3$  и при  $r_{H_2}=5\%$  плотность равна  $22\text{A}/\text{м}^2$ . При возрастании добавки водорода возрастает плотность ионного тока, при  $\alpha = 1.1$  и при  $r_{H_2}=5\%$  плотность равна  $52\text{A}/\text{м}^2$ , а при  $r_{H_2}=56\%$  плотность равна  $22\text{A}/\text{м}^2$ .

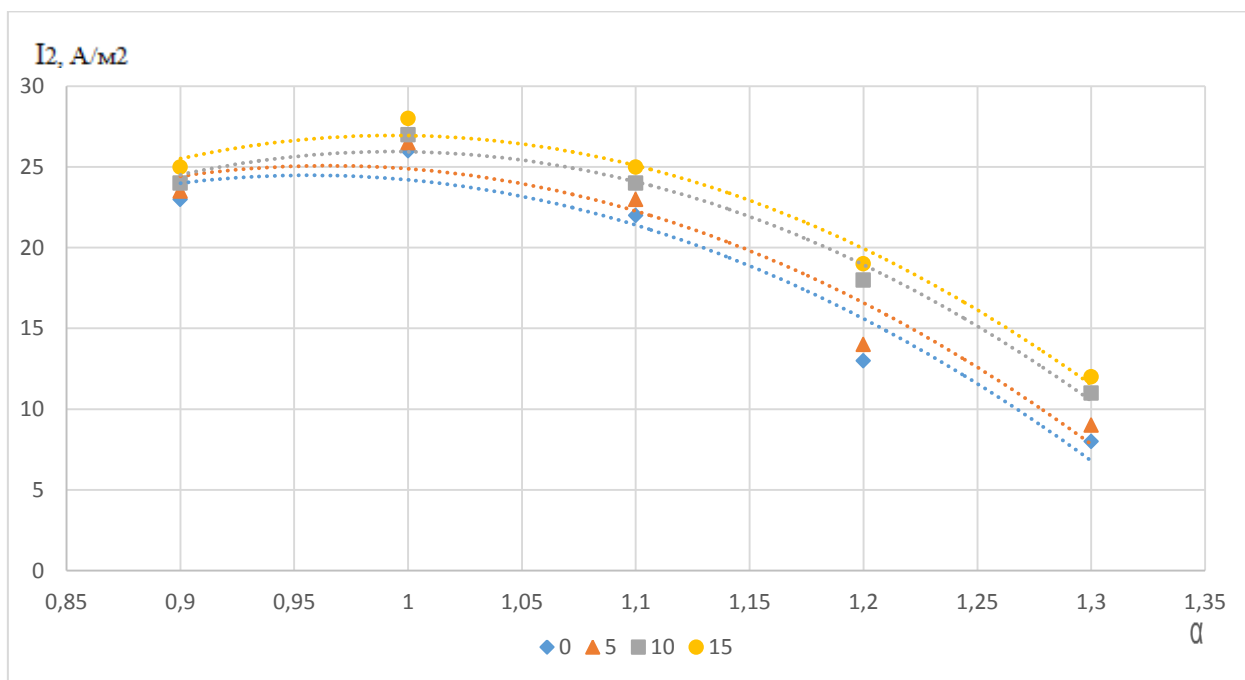


Рисунок 4.19 – Зависимость плотности ионного тока от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в метановоздушную смесь, расположенную в основной фазе сгорания ( $n=900\text{об}/\text{мин}$ )  $I_2$ , где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=5\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=10\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=15\%$

На удаленном расстоянии от свечи зажигания плотность ионного тока ведет себя так же. Для метановоздушной смеси существовал недостаток, который отражался, когда водород был выше 5%, на плотность ионного тока. Данные представления говорят о том, что это все содержится в зависимости электропроводности фронта пламени от скопления СН.

Так при  $\alpha = 1.0$  и при  $r_{H_2}=5\%$  плотность равна  $26\text{A}/\text{м}^2$ , а при  $r_{H_2}=15\%$  плотность равна  $28\text{A}/\text{м}^2$ . Замечаем, что плотность ионного тока на удаленном расстоянии от свечи меньше, чем плотность в первой фазе сгорания. При  $\alpha$

=1.3 и при  $r_{H_2}=5\%$  плотность равна  $9A/m^2$ , а при  $r_{H_2}=15\%$  плотность равна  $12A/m^2$ .

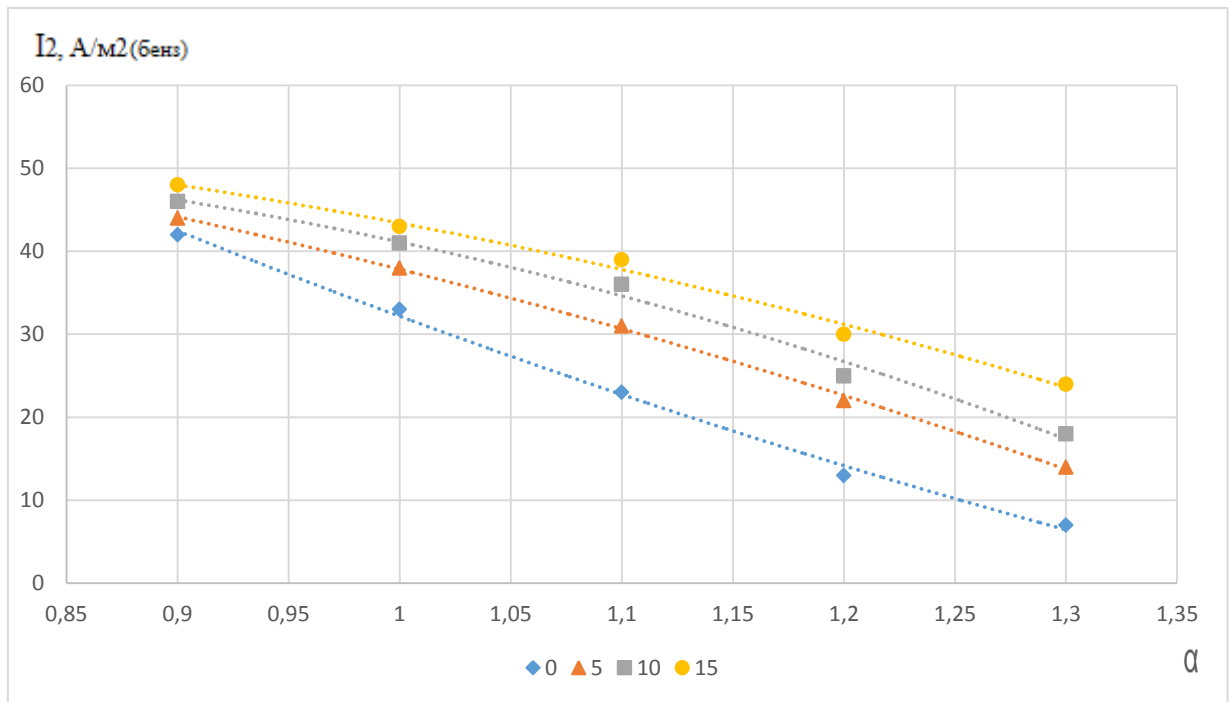


Рисунок 4.20 – Зависимость плотности ионного тока от коэффициента избытка воздуха и добавок водорода в бензовоздушную смесь, расположенную в основной фазе сгорания ( $n=900\text{об/мин}$ )  $I_2$  (бенз), где  $\diamond$  –  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\Delta$  –  $r_{H_2}=5\%$ ;  $\square$  –  $r_{H_2}=10\%$ ;  $\circ$  –  $r_{H_2}=15\%$

Воздействие добавок долей водорода на насыщенность ионного тока на удаленном расстоянии от свечи зажигания, для бензовоздушной смеси показано на рис 4.20.

Возможный запас создания СН отображает объем углерода в топливе, а темп роста сгорания в период горения ТВС, определяет насыщенность создания радикалов. Происходит совершение прироста скорости огня, при доле добавки водорода в ТВС, и снижение насыщенности углерода в ТВС. Плотность ионного тока выше у бензовоздушной смеси, чем у метановоздушной, все это обуславливается нахождением массовой доли углерода в

ТВС. Так при  $\alpha = 1.0$  и при  $\gamma_{H_2} = 5\%$  плотность равна  $38 \text{ A/m}^2$ , а при  $\gamma_{H_2} = 15\%$  плотность равна  $42 \text{ A/m}^2$ .

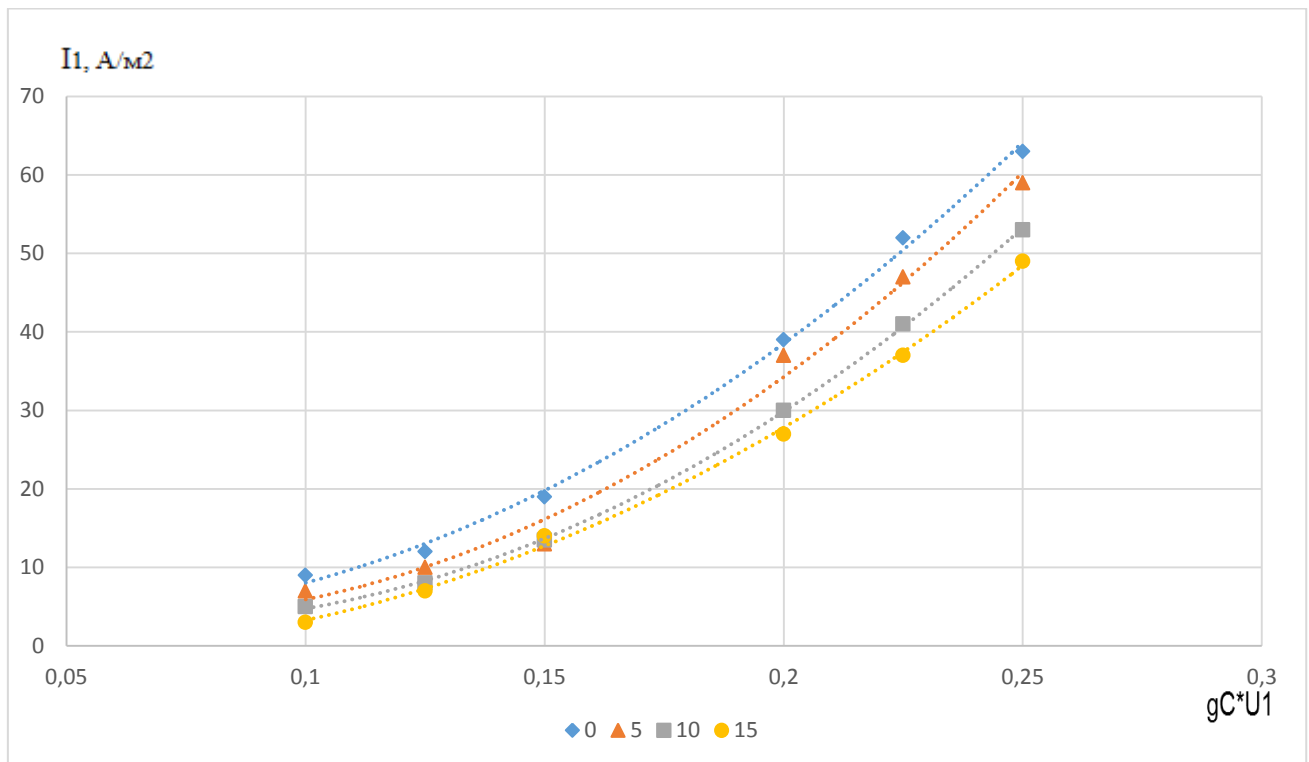


Рисунок 4.21 – Связь плотности ионного тока в первой фазе сгорания метановодородновоздушной смеси от скорости распространения пламени умноженной на массовую долю углерода в ТВС  $g_C \cdot U_1$  ( $n=900 \text{ об/мин}$ )

Наконец, на графике мы увидели, как зависит скорость распространения пламени умноженная на концентрацию углерода от плотности тока в первой фазе сгорания с добавкой водорода

Определенную роль обязательно устанавливать соответствие данных, которое определяет ионизацию пламени и, значит, роль ионного тока в пламени.

Данная методика должна предопределять массовую долю углерода и скорость распространения пламени на ИД, которая установлена формулами, которые ярко отражают массовые доли углерода, водорода и кислорода в МВВС:

$$g_C = \frac{1 - g_{H_2}}{1 + \alpha \cdot [L_{CH_4} \cdot (1 - g_{H_2}) + g_{H_2} \cdot L_{H_2}]} \cdot \frac{\mu_C}{\mu_{CH_4}}, \quad (4.15)$$

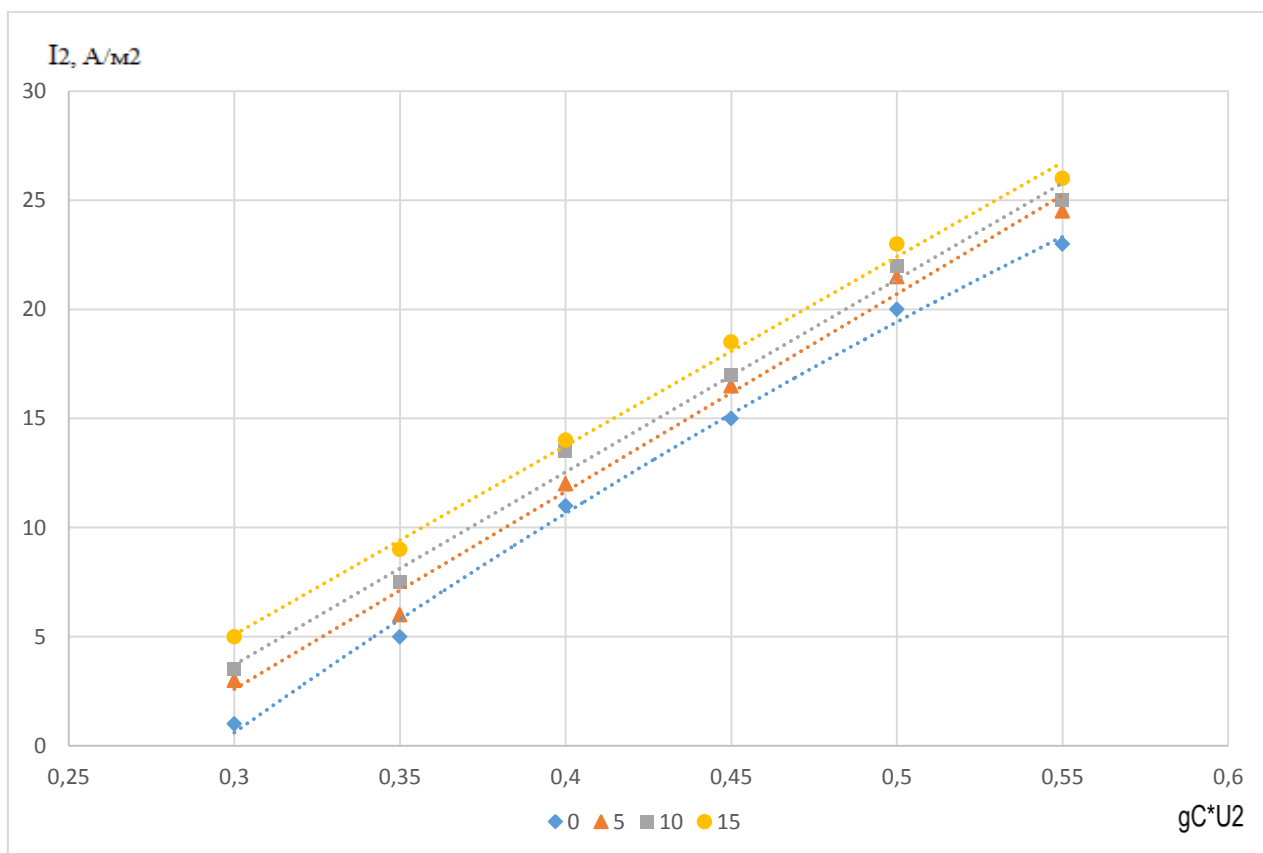


Рисунок 4.22 – Связь плотности ионного тока в основной фазе сгорания метановодородновоздушной смеси от скорости распространения пламени умноженной на массовую долю углерода в ТВС  $g_C \cdot U_2$  ( $n=900$  об/мин)

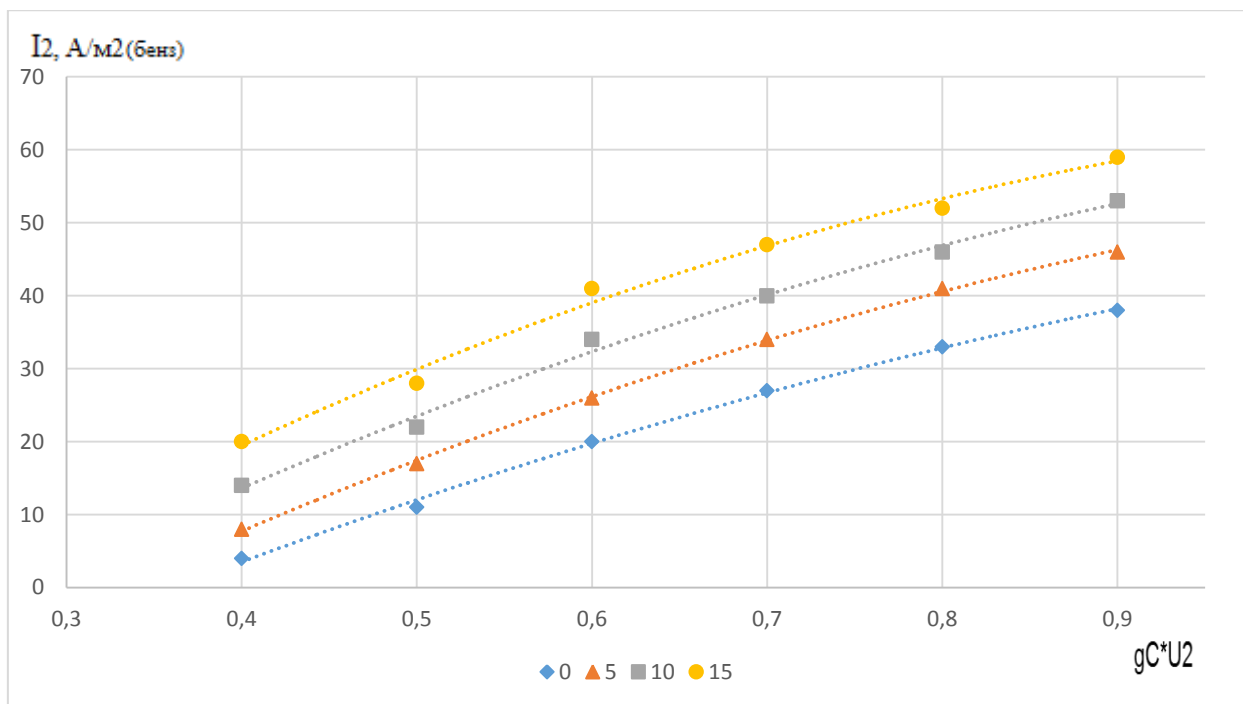


Рисунок 4.23 – Связь плотности ионного тока в основной фазе сгорания бензовоздушной смеси  $gC \cdot U_2$  ( $n=900$  об/мин)

Наконец мы получили зависимость, которая в будущем может подойти для дальнейших опытов, плотности ионного тока, которая выражается линейным законом от произведения скорости распространения пламени на массовую концентрацию углерода в ТВС, для бензовоздушной смеси, с добавкой водорода.

Появилась линейная связь ионного тока от произведения массовой доли углерода и скорости распространения пламени для разных видов топлива. Таким образом, при относительной оценке действий, совершающихся в области горения углеводородного топлива, по ионному току более соответственным параметром способно являться произведение скорости распространения пламени на массовую долю углерода в ТВС.

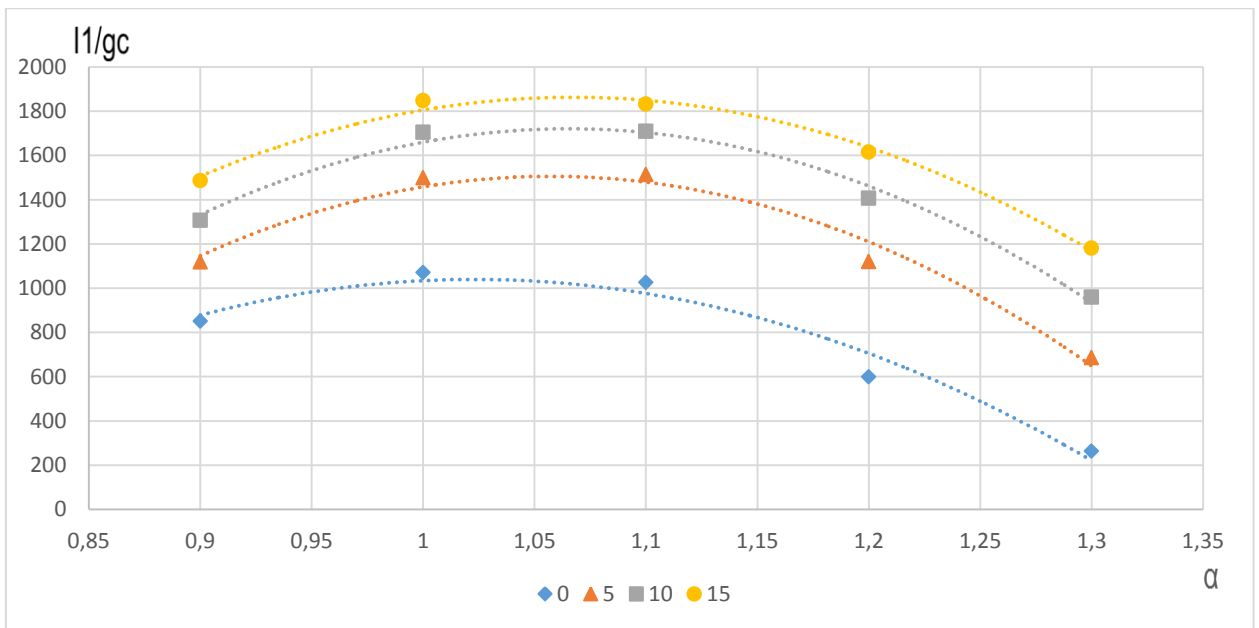


Рисунок 4.24 – Связь плотности ионного тока в первой фазе сгорания деленное на массовую долю углерода в ТВС ( $I_1/gc$ ) от коэффициента избытка воздуха ( $n=900\text{об/мин}$ )

На рисунке 4.24 мы замечаем, связь плотности ионного тока в первой фазе сгорания деленную на массовую долю углерода от коэффициента избытка воздуха. Видно, что, при добавке водорода плотность тока увеличивается, самое максимальное увеличение плотности ионного тока происходит при добавке водорода в 5%.

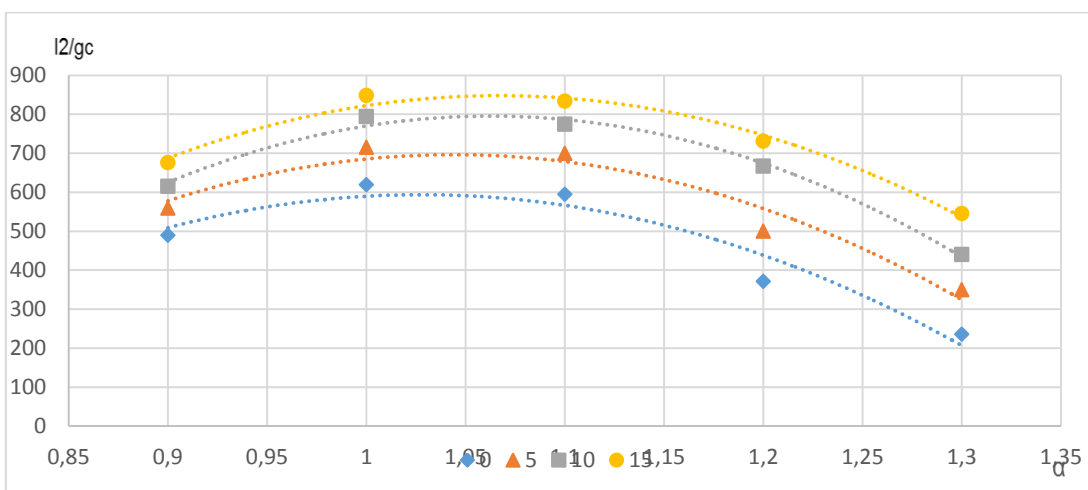


Рисунок 4.25 – Связь плотности ионного тока во второй фазе сгорания деленное на массовую долю углерода в ТВС ( $I_2/gc$ ) от коэффициента избытка воздуха ( $n=900\text{об/мин}$ )



Из рисунка 4.25 замечаем, что при делении плотности ионного тока на массовую долю углерода во второй фазе сгорания, ионный ток гораздо меньше чем в первой фазе. При доле добавки водорода в 5% происходит увеличение ионного тока, так как водород влияет на процессы сгорания, но уже не на столько, сколько в первой фазе сгорания. В обеих фазах сгорания с обеднением смеси ионный ток деленный на массовую долю углерода уменьшается.

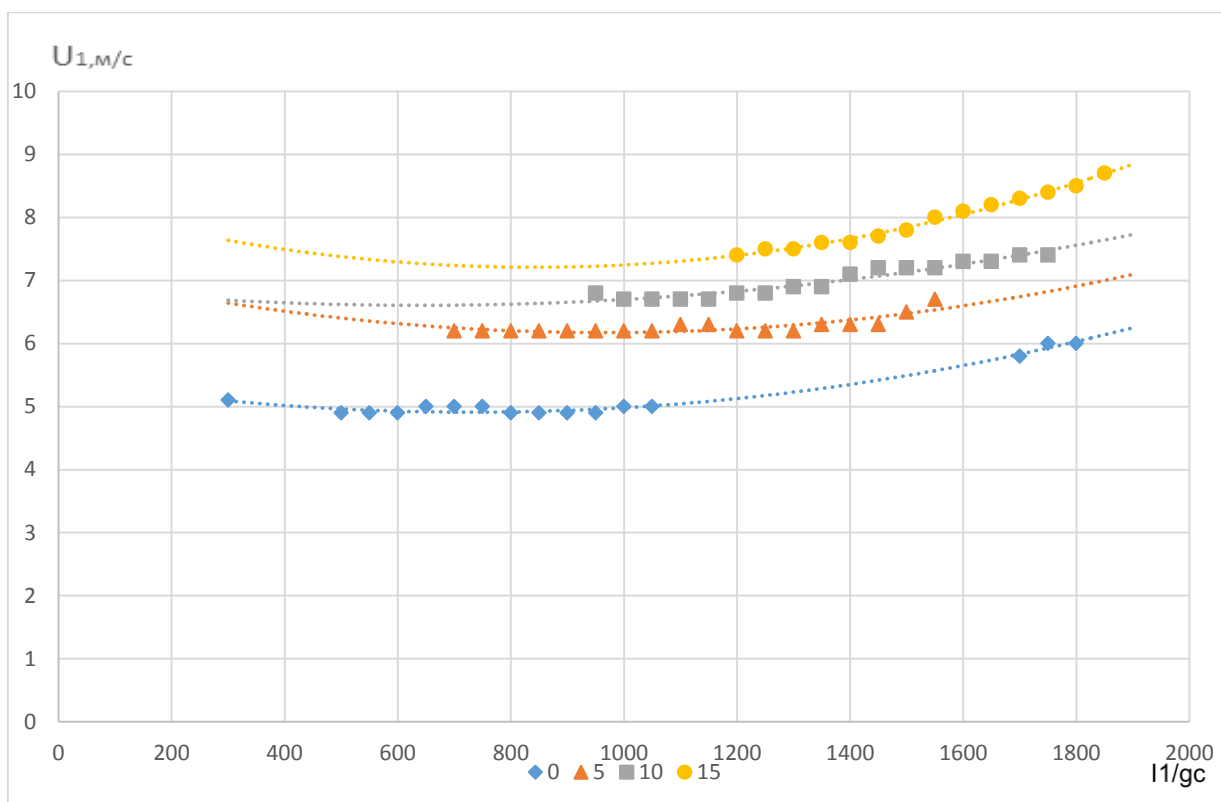


Рисунок 4.26 – Зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от плотности ионного тока в первой фазе сгорания деленную на массовую долю углерода ( $n=900$  об/мин)

Если рассмотреть плотность ионного тока, деленную на массовую долю углерода, как отдельный параметр, мы получаем зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от плотности ионного тока в первой фазе сгорания деленную на массовую долю углерода ( $n=900$  об/мин). При увеличении плотности и уменьшении массовой доли уг-

лерода, увеличивается скорость распространения пламени в первой фазе сгорания, это все происходит из-за процессов сгорания, из-за химиионизации топлива. Самый заметный прирост скорости происходит при 15% добавке водорода и увеличении параметра  $I_1 g_c$  до 1800.

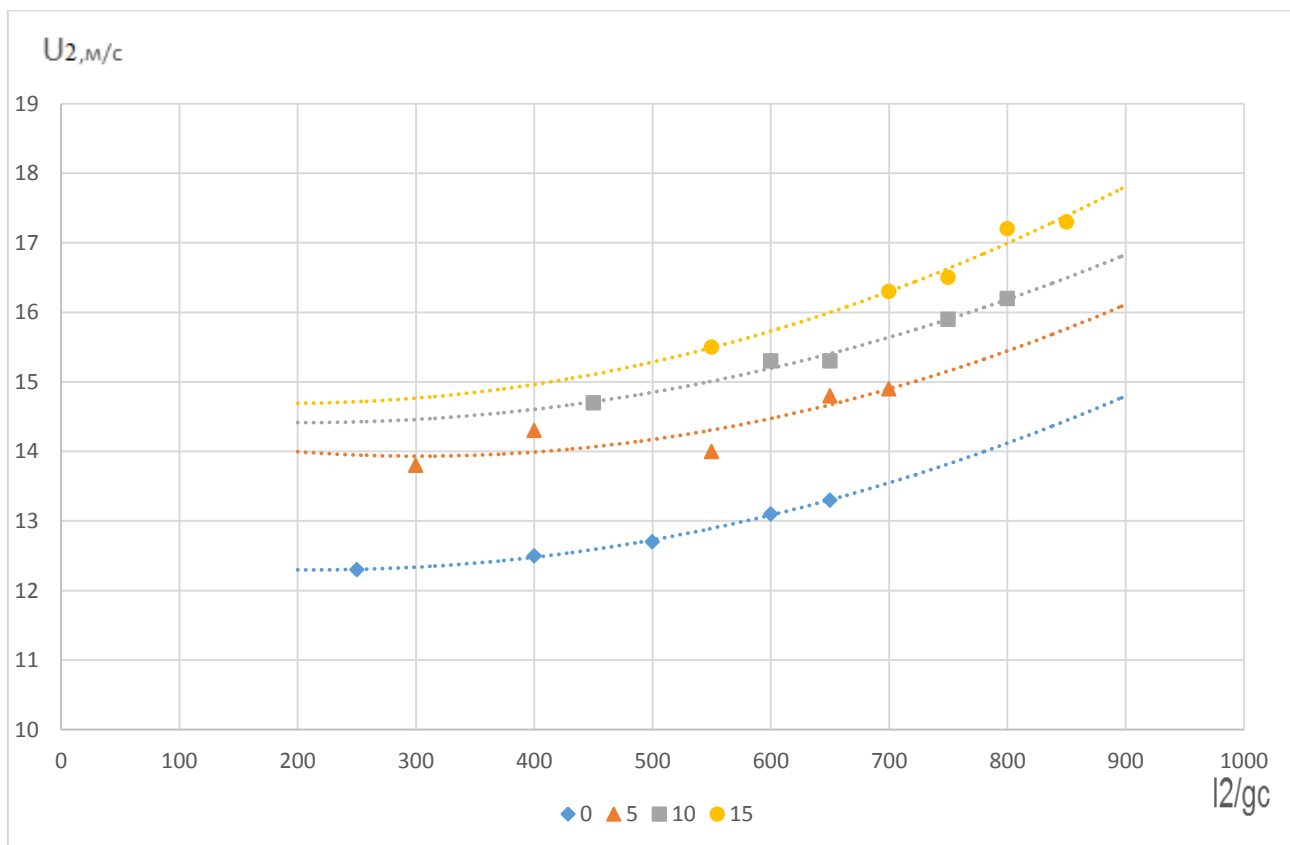


Рисунок 4.27 – Зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от плотности ионного тока в первой фазе сгорания, деленную на массовую долю углерода ( $n=900$  об/мин)  $I_2/g_c$

Во второй фазе сгорания скорость распространений пламени относительно нашего параметра  $I_1 g_c$ , увеличивается по линейному закону и так же максимальное значение скорости достигается, при добавке водорода в 15 % и увеличении нашего параметра до 900.

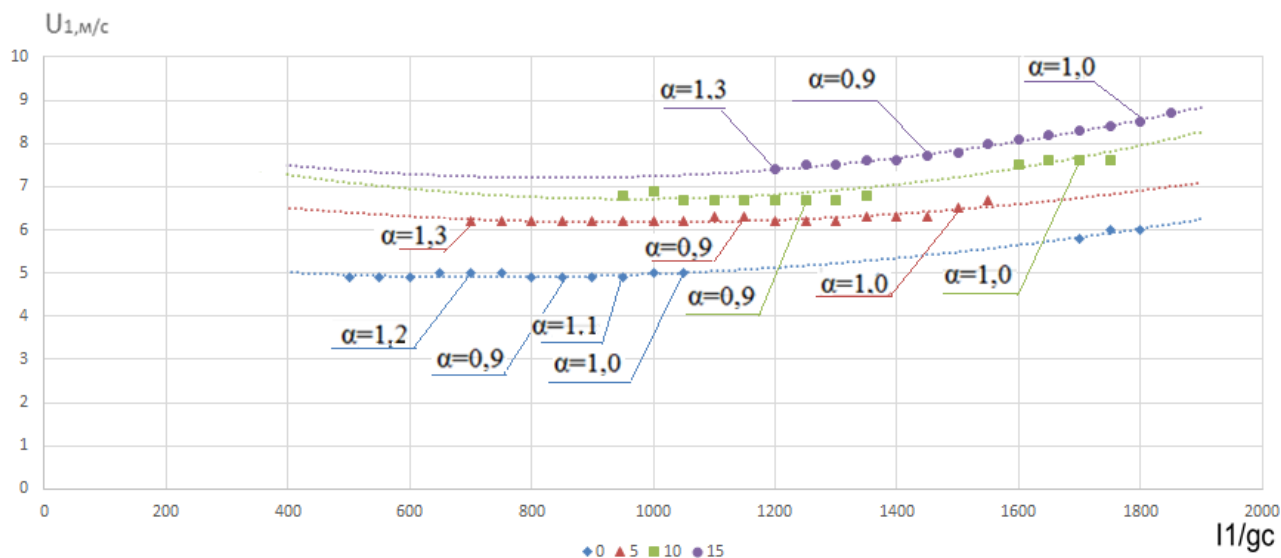


Рисунок 4.28– Зависимость средней скорости распространения фронта метановоздушного пламени от плотности ионного тока в первой фазе сгорания, деленную на массовую долю углерода ( $n=900$  об/мин)

Так как мы знаем, что добавка водорода является активизирующей добавкой топлива и улучшает эффективность рабочего процесса. Весь процесс показанный на всех рисунках может отражать явление электропроводности пламени углеводородного топлива. Скорость распространения пламени определяет полноту и длительность процесса сгорания при изменении физико-химических свойств ТВС [12,13,14,15].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно подвести итоги и выделить ключевые моменты диссертационной работы по исследованию характеристик распространения пламени в 1 и 2-ой фазах сгорания и ионного тока во фронте пламени, определяющих эффективность и экологичность работы ДВС и сформулировать следующие заключения:

1. Экспериментально определено, что в 1-ой и 2-ой фазах сгорания при добавлении водорода существенно повышается темп распространения фронта пламени в метановоздушной и бензовоздушной консистенций при разных скоростных режимах.

2. Обнаружена прямолинейная связь, скорости распространения пламени с соответствием ионного тока к массовой доле углерода, каковая сохраняется при изменении типа горючего, части в нём водорода, интенсивности турбулентности и коэффициента избытка воздуха.

3. Опытным путем найдена прямолинейная зависимость скорости в 2-ой фазе сгорания, от быстроты в 1 фазе сгорания, и, повышение скорости  $U_1$  отвечает увеличению скорости  $U_2$ ;

4. Выявлена прямолинейная взаимозависимость ионного тока в 2-ой фазе сгорания от ионного тока в 1-ой фазе сгорания, при этом повышение уровня  $I_1$  отвечает увеличению  $I_2$ . Следовательно, по показаниям ионного тока ИД, находящегося в свече зажигания, возможно прогнозировать величину ионного тока в 2-ой фазе сгорания и скорость распространения пламени при отсутствии применения вспомогательного измерительного оборудования.

5. Предложенный комплекс  $I_2/g_c$ , показывает возможность оценки турбулентной скорости распространения пламени с учётом интенсивности протекания химических реакций горения по величине ионного тока для различных видов топлива с химическими активаторами горения.

### Список используемых источников

1. Upadhay D., Rizzoni G. AFR Control on a Single Cylinder Engine Using the Ionization Current // SAE 980203.
2. Hellring M., Munter T., Rögnavaldsson T., Wikström N., Carlsson C., Larsson M., Nytomt J. Robust AFR Estimation Using Ion Current and Neural Networks // SAE 1999-01-1161.
3. Saitzkoff A., Reinmann R., Mauss F., Glavmo M. In-Cylinder Pressure Measurements Using the Sparg Plug as an Ionization Sensor // SAE 970857.
4. VanDyne E.A., Burcmyer C.L., Wahl A.M., Funaioli A.E. Misfire Detection from Ionization Feedback Utilizing the Smartfire Plasma Ignition Technology // SAE 2000-01-1377.
5. Auzins J., Johansson H., Nytomt J. Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock, and Engine Control // SAE 950004.
6. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Семченко В.В., Русаков М.М., Прусов П.М. Механизм снижения несгоревших углеводородов и повышение эффективности работы при добавке водорода в топливно-воздушную смесь ДВС (статья). Журнал: НАУКА производству, М, 2001, № 9, с.4...6.
7. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Семченко В.В., Русаков М.М., Прусов П.М. Механизм снижения концентрации несгоревших углеводородов и повышение эффективности работы при добавке водорода в топливно-воздушную смесь ДВС (статья). Материалы международной научно-технической конференции, посвященной памяти Генерального конструктора аэрокосмической техники, академика Н.Д. Кузнецова, 21-22 июня 2001г., г. Самара, с.91-97.
8. Гутаревич, Ю. Ф. Снижение вредных выбросов автомобиля в эксплуатационных условиях / Ю. Ф. Гутаревич. – Киев : Выща шк., 1991. – 179 с.,
9. Хитрин, Л. Н. Физика горения и взрыва / Л. Н. Хитрин. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1957. – 443 с.
10. Шайкин А.Д., Жукова В.А. Техн. отчет № 001, 2286 КМЗ, 1972.

11. Бобровский И.Н., Ивашин П.В., Дурманова Н.А., Позин М.А., Шайкин А.П. Взаимосвязь интенсивности горения и ширины зоны химических реакций горения и несгоревших углеводородов в отработавших газах двигателя с искровым зажиганием. Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Стратегическое планирование развития городов России. Памяти первого ректора ТГУ С.Ф. Жилкина», 21-22 июня 2010г., Тольятти, ТГУ, 2010, т.2, с.158-165
12. Смоленский В.В. Особенности процесса сгорания в бензиновых двигателях при добавке водорода в топливно-воздушную смесь [Текст]: Автореф. дис. канд. тех. наук / В.В. Смоленский - Тольятти: ТГУ, 2007.
13. Коломиец П.В. Влияние скорости распространения пламени на выделения оксидов азота при добавке водорода в бензиновые двигатели // диссертация кандидата технических наук. - Тольятти, - 2007. - 137 с.
14. Yasnikov I. S. on the question of turbulent flame propagation in a closed volume / I. S. Yasnikov, P. V. Ivashin, A. P. Shaykin // *Journal of technical physics*. 2013. Vol. 83. No. 11. P. 39-43.
15. Shaikin A.P., Bobrovskiy I.N., Deryachev A.D., Ivashin P.V., Galiev I.R., Tverdokhlebov A.Y. Use of Ionization Sensors to Study Combustion Characteristics in Variable Volume Chamber. 2018 Global Smart Industry Conference (Glo-SIC). 978-1-5386-7386-7/18/\$31.00 ©2018 IEEE.
16. Абрамчук, Ф. И. Влияние добавки водорода к природному газу на свойства смесового топлива / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов, Г. В. Майстренко // Сборн. труд. ХНТУ. – Харьков, 2009.
17. Автомобильные двигатели / под ред. М. С. Ховаха. – М.: Машиностроение, 1977. – 591 с.
18. Аравин, Г. С. Ионизация пламенных газов в условиях бомбы и двигателя : дис. ... канд. тех. наук / Аравин Гавриил Степанович. – М., 1952.
19. Аравин, Г. С. О связи между скоростями химической ионизации и реакции горения в ламинарном пламени / Г. С. Аравин, Е. С. Семенов // *Физика горения и взрыва*. – 1979. – №5.

20. Бондаренко, С. Ю. Влияние конструктивных и режимных параметров на эффективность горения природного газа в кольцевых авиационных камерах сгорания / С. Ю. Бондаренко, А. М. Ланский, А. П. Шайкин // Материалы межотраслевых научно-технических конференций совещаний, семинаров и выставок. ВИМИ. – 1982. – С. 123.
21. Бортников, Л. Н. Некоторые особенности горения бензоводородовоздушной смеси в цилиндре ДВС / Л. Н. Бортников // Физика горения и взрыва. – 2007. – №4.
22. Бортников, Л. Н., Оценка экономических и экологических показателей поршневых ДВС с искровым зажиганием при их работе на смеси «бензин-водород» / Л. Н. Бортников, М. М. Русаков // Автомобильная промышленность. – 2008. – №3. – С.11.
23. Брозе, Д. Д. Сгорание в поршневых двигателях / Д. Д. Брозе. – М. : Машиностроение, 1969. – 248 с.
24. Брызгалов, А. А. Добавка водорода в метановоздушную смесь газового двигателя / А. А. Брызгалов, А. П. Шайкин. – Тольятти, 2010.
25. Будаев, С. И. Электропроводность пламени и скорость сгорания топливно-воздушной смеси в двигателе с искровым зажиганием / С. И. Будаев, П. В. Ивашин, В. В. Смоленский, А. П. Шайкин // Автотракторное оборудование. – 2004. – №3. – С. 42.
26. Буров, А. Л. Сгорание в поршневых двигателях : учебное пособие / А. Л. Буров. – М. : МГИУ, 2006. – 76 с.
27. Быков, Г. А. Детонационные ограничения при использовании альтернативных топлив в двигателях с искровым зажиганием / Г. А. Быков // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 1995. – №3. - С. 3.
28. Вагнер, В. А. Альтернативные топлива в дизелях и их влияние на рабочий процесс и экологические параметры : дис. ...д-ра тех. наук / Вагнер В. А. – М., 1994. – 365 с.
29. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Ма-

ас, Р. Диббл; пер. с англ. Г. Л. Агафонова под ред. П. А. Власова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.

30. Варшавский, И. Л. Снижение токсичности ОГ бензинового двигателя применением добавок водорода / И. Л. Варшавский, А. И. Мищенко, А. И. Талда // Тезисы докладов на ВНПК «Защита Воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами ТС». – 1977.

31. Вибе, И. И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя / И. И. Вибе. – Свердловск : Машгиз, 1962. – 271 с.

32. Власов, П. А. Методы исследования кинетики ионизации в ударных волнах / П. А. Власов, Ю. К. Карасевич, В. А. Полянский // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2008. – № 2.

33. Воинов, А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях / А. Н. Воинов. – М. : Машиностроение, 1977. – 277 с.

34. Гайнуллин, Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Гриценко. – М. : Недра, 1986. – 255 с.

35. Галышев, Ю. В. Анализ перспективы создания водородных двигателей / Ю. В. Галышев //Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 2. – С. 19-23.

36. Смоленский, В. В. Влияние добавки водорода на турбулентную скорость распространения фронта пламени бензовоздушной смеси в установке УИТ-85 / В. В. Смоленский // Материалы международной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии». – 2010. – С. 188-196.

37. Смоленский, В.В. Влияние ширины зоны химических реакций и электропроводности пламени на токсичность процесса сгорания в поршневой установке при добавке водорода в бензовоздушную смесь / В. В. Смоленский // Материалы международной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии». – 2010. – С. 196-203.

38. Смоленский, В. В. Особенности процесса сгорания в бензиновых двигателях при добавке водорода в топливно-воздушную смесь : автореф. дис.



- ... канд. тех. наук : 05.04.02 / Смоленский Виктор Владимирович. – Тольятти, 2007. – 20 с.
39. Соколик, А. С. Основы теории процесса нормального сгорания в двигателях с искровым зажиганием / А. С. Соколик. – М. : АН СССР, 1951.
40. Бортников, Л. Н. Некоторые особенности горения бензоводородовоздушной смеси в цилиндре ДВС / Л. Н. Бортников // Физика горения и взрыва. – 2007. – №4.
41. Соколик, А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах / А. С. Соколик. – М. : АН СССР, 1960. – 427 с.
42. Степанов, Е. М. Ионизация в пламени и электрическом поле / Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков. – М. : Metallurgia, 1968. – 312 с.
43. Автомобильные двигатели / под ред. М. С. Ховаха. – М. : Машиностроение, 1977. – 591 с.
44. Талантов, А. В. Основы теории горения / А. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1975. – 251 с.
45. Талда, Г. Б. Повышение топливной экономичности и снижение токсичности бензиновых двигателей добавкой водорода к бензину : дис. ... канд. тех. наук : 05.04.02 / Талда Геннадий Борисович. – Харьков, 1984. – 213 с.
46. Трелин, Ю. А. Исследование особенностей работы ДВС с искровым зажиганием при добавке водорода в топливовоздушную смесь : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.04.02 / Трелин Юрий Александрович. – Волгоград, 1981.
47. Хайк, Н. Возможность использования ионизационных датчиков в системах управления рабочим процессом ДВС : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.04.02 / Хайк Надим. – Волгоград, 1991. – 16 с.
48. Аравин, Г. С. О связи между скоростями химической ионизации и реакции горения в ламинарном пламени / Г. С. Аравин, Е. С. Семенов // Физика горения и взрыва. – 1979. – №5.

49. Хачиян, А. С. Использование природного газа в качестве топлива для автомобильного транспорта / А. С. Хачиян // Двигателестроение. – 2002. – №1. – С. 34-36.
50. Хитрин, Л. Н. Физика горения и взрыва / Л. Н. Хитрин. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1957. – 443 с.
51. Хмыров, В. И. Водородный двигатель / В. И. Хмыров, Б. Е. Лавров. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1981 – 111 с.
52. Чен, Ф. Электрические зонды. Диагностика плазмы / Ф. Чен; под ред. Р. Хаддлстоуна, С. М. Леонарда. – М. : Мир, 1967.
53. Власов, П. А. Методы исследования кинетики ионизации в ударных волнах / П. А. Власов, Ю. К. Карасевич, В. А. Полянский // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2008. – № 2.
54. Шайкин, А. П. Управление коэффициентом избытка воздуха ДВС с помощью тока ионизации / А. П. Шайкин, О. А. Ахремочкин, В. Н. Гордеев, П. В. Ивашин // Материалы международной научной конференции «Современные тенденции развития автомобилестроения в России». – 2003. – С.156-157.
55. Шайкин, А. П. Сгорание топливно-воздушной смеси вблизи стенки цилиндра двигателя с искровым зажиганием / А. П. Шайкин, И. Н. Бобровский, П. В. Ивашин, Н. А. Дурманова, Н. А. Понизов // Вектор науки ТГУ. – 2010. – № 2(12). – С.52-56.
56. Канило, П. М. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта / П. М. Канило, К. В. Костенко // Автомобильный транспорт. – 2008. – № 23. – С. 107 – 113.
57. Шайкин, А. П. О возможных причинах снижения концентрации несгоревших углеводородов при добавке водорода в ТВС ДВС / А. П. Шайкин, П. В. Ивашин, С. И. Будаев // Материалы международной научной конференции «Прогресс транспортных средств и систем». – 2002. – С. 136-140.
58. Шайкин, А. П. Механизм снижения несгоревших углеводородов и повышение эффективности работы при добавке водорода в топливно-

воздушную смесь ДВС / А. П. Шайкин, П. В. Ивашин, В. В. Семченко // Наука производству. – 2001. – №9.

59. Шайкин, А. П. Влияние добавки водорода на токсичность и экономичность ДВС с искровым зажиганием / А. П. Шайкин, П. В. Ивашин, В. В. Семченко // Инженер, технолог, рабочий. – 2001. – № 3. – С. 22-24.

60. Шайкин, А. П. Водород и ДВС / А. П. Шайкин, М. М. Русаков, Л. Н. Бортников, А. Н. Афанасьев // Материалы международной научной конференции «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения». – 2003. – С. 62-63.

61. Шайкин, А. П. Водород и автомобиль сегодня / А. П. Шайкин, М. М. Русаков, Л. Н. Бортников // Материалы международной научной конференции «Автомобиль и техносфера». – 1999. – С. 33-34.

62. Шайкин, А. П. ДВС с добавкой водорода в топливно-воздушную смесь для городского автомобиля / А. П. Шайкин, М. М. Русаков, Л. Н. Бортников, В. Н. Пелипенко // Материалы научной конференции «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». – 2002.

63. Шайкин, А. П. Добавки в бензовоздушную смесь, пределы воспламенения, токсичность двигателей внутреннего сгорания / А. П. Шайкин, М. М. Русаков, В. Н. Пелипенко, О. А. Ахремочкин // Материалы XII симпозиума по горению и взрыву «Химическая физика процессов горения и взрыва». – 2000.

64. Шайкин, А. П. Пределы стабильного горения бензовоздушных смесей с добавками в ДВС / А. П. Шайкин, М. М. Русаков, В. Н. Пелипенко, О. А. Ахремочкин // Вестник Самарского аэрокосмического университета. – 1999. – С. 144-148.

65. Гайнуллин, Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Гриценко. – М. : Недра, 1986. – 255 с.,

66. Гальшев, Ю. В. Анализ перспективы создания водородных двигателей / Ю. В. Гальшев // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 2. – С. 19-23.

67. Гатауллин, Н. А. Влияние добавок водорода на экономические и экологические показатели газового двигателя Камаз-820.53-260 / Н. А. Гатауллин, Ю.Ф. Гортышов, В. М. Гуреев, К. В. Нефёдов и др. // Материалы конференции «Водородная энергетика». – 2007. – С. 136-138.,
68. Гутаревич, Ю. Ф. Снижение вредных выбросов автомобиля в эксплуатационных условиях / Ю. Ф. Гутаревич. – Киев : Выща шк., 1991. – 179 с.,
69. Дурманов А.И., Дурманова Н.А., Шайкин А.П. Определение скоростей распространения пламени в зоне завершения сгорания поршневой энергетической установки с искровым зажиганием. Перспективные направления развития автотранспортного комплекса. VIII Международная научно-производственная конференция. Сб. статей, 19-21 ноября 2014 г., Пенза, с. 38-41
70. Иноземцев, Н. В. Процессы сгорания в двигателях / Н. В. Иноземцев, В. К. Кошкин. – М. : Машгиз, 1949. – 344 с.
71. Иноземцев, Н. В. Процессы сгорания в двигателях / Н. В. Иноземцев, В. К. Кошкин. – М. : Машгиз, 1949, таблица 28.
72. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов / Р. З. Кавтарадзе. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с
73. Канило, П. М. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта / П. М. Канило, К. В. Костенко // Автомобильный транспорт. – 2008. – № 23. – С. 107 – 113.
74. Каштанов, Н. О Применении водорода в карбюраторных и дизельных двигателях / Н. О. Каштанов // Сборник научных трудов «Проблемы экономии топлива на автомобильном транспорте». – 1983
75. Лютко, В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В. Н. Луканин, А. С. Хачиян. – М. : МАДИ(ТУ), 2000. – 311 с

76. Луканин, В. Н. Экологическое воздействие автомобильных двигателей на окружающую среду / В. Н. Луканин, Ю. В. Трофименко // Итоги науки и техники. – 1993. – С. 11–36.,
77. Мисбахов, Р. Ш. Влияние добавок водорода на технико-экономические и экологические показатели газовых и дизельных двигателей: автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.04.02 / Мисбахов Ринат Шаукатович. – Казань, 2010. – 20 с.
78. Мищенко, А. И. Состояние работ по исследованию водорода в качестве дополнительного топлива для автомобильных двигателей / А. И. Мищенко // Проблемы экономии топлива на автомобильном транспорте. – 1983. – С. 17–27
79. Морозов, К. А. Токсичность автомобильных двигателей /К. А. Морозов. – М. : Легион-Автодата, 2001. – 80 с.,
80. Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 154 с.,
81. Зельдович, Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М. : Наука, 1980. – 478 с.
82. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. с англ. / Ред. Н. А. Чигир. – М. : Машиностроение, 1981., Wentworth, J. T. Piston and ring variables affect exhaust hydrocarbon emissions / J. T. Wentworth // SAE Paper. – 1971. – № 710587.
83. Основы практической теории горения : учебное пособие / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др.; под ред. В. В. Поиеранцева. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 312 с
84. Прохоров, Б. Б. Экология человека / Б. Б. Прохоров. – М. : Академия, 2011. – 360 с., Heywood, J. V. Internal combustion engine fundamentals / J. V. Heywood. – New York : McGraw-Hill, 1988. – 931 p.

## Приложение А

Таблица А.1 и А.2 – Зависимость ионного тока от величины прибавляемого в нее водорода, состава ТВС и скоростного режима двигателя.

**Таблица А.1**

$r_{H_2}$ , %	$\alpha$	$I_1$ , мкА	$I_2$ , мкА
$n_{квд}=600$ об/мин			
0	0,9	245,32	161,56
	1,0	263,34	178,14
	1,1	255,23	176,76
	1,2	203,54	150,68
	1,3	130,65	68,87
29	0,9	284,44	180,34
	1,0	302,97	185,76
	1,1	293,56	181,37
	1,2	260,67	166,48
	1,3	210,36	118,44
47	0,9	307,81	175,55
	1,0	318,31	181,25
	1,1	314,49	178,58
	1,2	280,54	165,18
	1,3	230,59	130,15
58	0,9	298,35	172,86
	1,0	309,34	179,56
	1,1	301,15	177,93
	1,2	270,74	165,86
	1,3	220,23	130,38

Таблица А.2

$r_{H2}, \%$	$\alpha$	$I_1, \text{мкА}$	$I_2, \text{мкА}$
$n_{\text{квд}}=900 \text{ об/мин}$			
0	0,9	315,23	183,15
	1,0	348,12	200,17
	1,1	280,14	169,65
	1,2	172,34	117,38
	1,3	90,65	59,87
29	0,9	362,21	183,11
	1,0	430,12	207,54
	1,1	380,65	185,47
	1,2	283,76	140,23
	1,3	190,23	87,12
47	0,9	400,23	183,76
	1,0	450,54	198,45
	1,1	382,23	174,23
	1,2	282,23	120,91
	1,3	197,76	87,98
58	0,9	430,34	183,39
	1,0	475,86	200,12
	1,1	415,23	170,33
	1,2	315,42	120,98
	1,3	208,45	87,29

## Приложение Б

Таблица Б.1 и Б.2 - Средняя скорость фронта пламени в 1-ой и основной фазах сгорания и её взаимозависимость от состава топливоздушной смеси, величины прибавляемого в нее водорода и скоростного режима двигателя.

**Таблица Б.1**

$r_{H_2}, \%$	$\alpha$	$U_1, \text{ м/с}$	$U_2, \text{ м/с}$
$n_{\text{КВД}}=600 \text{ об/мин}$			
0	0,9	2,9	11,0
	1,0	4,1	11,3
	1,1	4,2	11,2
	1,2	4,2	11,0
	1,3	3,9	10,8
29	0,9	5,2	12,2
	1,0	5,6	12,7
	1,1	5,6	13,0
	1,2	5,5	12,9
	1,3	5,2	12,6
47	0,9	6,3	13,4
	1,0	6,8	14,1
	1,1	6,7	14,3
	1,2	6,2	14,2
	1,3	6,0	14,1
58	0,9	7,3	14,5
	1,0	7,5	15
	1,1	7,3	15,3
	1,2	7,0	15,3
	1,3	6,7	15,2



Таблица Б.2

$r_{H_2}$ , %	$\alpha$	$U_1$ , м/с	$U_2$ , м/с
$n_{квд}=900$ об/мин			
0	0,9	4,7	12,7
	1,0	5,2	13,3
	1,1	5,0	13,1
	1,2	4,6	12,5
	1,3	3,9	11,8
29	0,9	5,4	14,0
	1,0	6,5	14,9
	1,1	7,0	14,8
	1,2	6,5	14,3
	1,3	6,1	13,8
47	0,9	6,3	15,3
	1,0	7,8	16,2
	1,1	7,6	15,9
	1,2	7,2	15,3
	1,3	6,8	14,7
58	0,9	7,8	16,3
	1,0	8,7	17,3
	1,1	8,5	17,2
	1,2	8,1	16,5
	1,3	7,4	15,5