

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

«Тольяттинский государственный университет»
ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(наименование профиля магистерской программы)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Использование явления химической ионизации пламени для
определения характеристик сгорания композитного топлива в условиях
поршневого ДВС

Студент(ка)

А.В. Бобровский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

д.т.н., проф. А.П. Шайкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель магистерской
программы

д.т.н., профессор А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2018 г.

Допустить к защите

Зав. кафедрой
«ЭМиСУ»

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2018 г.

Тольятти 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	6
1.1 Методы улучшения характеристик ДВС.....	6
1.1.1 Применение непосредственного впрыска топлива.....	6
1.1.2 Использование композитных топлив.....	17
1.2 Обзор современных методов исследования процесса сгорания топлива в условиях поршневого ДВС искровым зажиганием.....	22
Выводы к главе 1.....	30
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	31
ГЛАВА 3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ	40
3.1. Связь ионного тока со скоростью распространения и шириной ЗХР пламени при изменении коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в топливе и частоты вращения коленчатого вала двигателя.....	40
3.2. Влияние пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени.....	48
3.3. Взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов с протяженностью зоны химических реакций.....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	57
СОКРАЩЕНИЯ ПРИНЯТЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ.....	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	62

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие требования законодательства в сфере снижения токсичности выбросов в отработавших газах (ОГ) и повышения энергетических показателей двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля, предполагают его совершенствование. Одним из наиболее токсичных компонентов в ОГ бензиновых ДВС с искровым зажиганием являются несгоревшие углеводороды (СН). Их содержание в ОГ составляет ~ 0,1 % об. и по этому показателю автомобильный транспорт является лидером загрязнения окружающей среды.

Существуют много методов решения проблем экологической безопасности: совершенствование конструкции ДВС, применение электропривода, улучшение систем каталитической нейтрализации токсичных компонентов ОГ. Однако все эти методы требуют серьезного конструктивного вмешательства в ДВС, что приводит к увеличению трудовых и материальных затрат. Поэтому, в настоящее время, правильная организация процесса сгорания альтернативных видов топлива, в частности, использование смеси бензина с водородом, является наиболее перспективным и широко применяемым способом улучшения характеристик двигателя, отвечающего всем мировым стандартам, без серьезного вмешательства в его конструкцию.

При сгорании углеводородного топлива в зоне горения наблюдается явление электропроводности пламени, обусловленное неравновесной концентрацией ионов и электронов. Это явление регистрируется при контакте углеводородного пламени с контактами ионизационного датчика, при котором в электрической цепи датчика появляется ионный ток. Величина ионного тока зависит от химического состава топлива, состава топливно-воздушной смеси (ТВС) и других параметров, при которых протекает процесс сгорания.

Обзор современных исследований показал, что до сих пор нет единого мнения об оптимальном соотношении бензина с водородом, что говорит о сложности и неоднозначности изучаемых процессов. Отсутствуют данные о влиянии добавок водорода на взаимосвязь выделения несгоревших углеводородов, электропроводности и скорости распространения фронта пламени топливовоздушной смеси в ДВС с искровым зажиганием. Это является необходимым условием для разработки методов исследования и контроля процесса сгорания в ДВС на основе мониторинга ионного тока.

Из вышесказанного следует, что выбранная тема исследований актуальна, как в теоретическом, так и в практическом плане.

Цель исследования: определить связь характеристик сгорания комбинированного топлива с электропроводностью фронта пламени в условиях поршневого ДВС с искровым зажиганием.

Задачи исследования:

1. Изучить связь ионного тока со скоростью распространения и шириной ЗХР пламени при изменении коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в топливе и частоты вращения коленчатого вала двигателя.
2. Определить влияние пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени.
3. Выявить связь концентрации несгоревших углеводородов с протяженностью зоны химических реакций.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Выявлена линейная связь электропроводности углеводородного пламени с местной скоростью распространения и протяженностью ЗХР пламени в условиях поршневого ДВС с искровым зажиганием.
2. Предложен комплекс Φ , который определять эффективность влияния добавки водорода на снижение несгоревших $СН$. Сходимость рассчитанных по разработанной формуле значений концентраций несгоревших $СН$ с результатами, полученными экспериментальным путём, превышает 90%.

Практическое значение представляют:

1. Определены составы топливных смесей и количество добавляемого водорода для обеспечения минимальных выбросов несгоревших углеводородов.
2. Разработаны методы исследования характеристик распространения пламени при сжигании бензина с добавкой водорода.

Апробация работы. Результаты исследования были представлены на научно-технических семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» ТГУ и доложены на всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей», Самарский государственный университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), 2017.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 статьи, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 3 таблицы и 27 рисунков. Библиографический указатель включает 29 источника, из которых 16 зарубежных. Объем диссертации составляет 86 страниц.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Методы улучшения характеристик ДВС

1.1.1 Применение непосредственного впрыска топлива

Главными задачами в развитии современного двигателестроения и автомобилестроения являются: высокая мощность двигателя, низкий удельный расход топлива, низкие выбросы, низкий уровень шума и комфорт при движении. С увеличением численности транспортных средств их роль в загрязнении воздуха возрастает с каждым днем. Поэтому в последнее время наметился устойчивый тренд законодательного ужесточения концентрации токсичных компонентов в отработавших газах автомобилей. Кроме этого, постоянно растущая цена на топливо требует повышения топливной экономичности и энергоэффективности двигателя. Поскольку карбюраторные двигатели не могут обеспечивать постоянный состав топливовоздушной смеси при различных условиях работы, поэтому каталитический нейтрализатор не может использоваться в этих двигателях. Поэтому карбюраторные двигатели обладают высокими значениями токсичности отработавших газов и низкой энергоэффективностью.

С 1980-х годов начали использоваться системы электронного впрыска топлива (PFI), использующие топливные форсунки вместо карбюратора. Преимуществом данных двигателей является возможность обеспечивать постоянный состав топливовоздушной смеси при различных условиях работы. Двигатели с системой электронного контроля подачи топлива могут соответствовать возрастающим требованиям экологического законодательства. Система электронного впрыска топлива по сравнению с карбюраторным имеет следующие преимущества:

1. Снижение токсичности выхлопных газов.
2. Увеличение мощности и крутящего момента.

3. Низкий удельный расход топлива.

4. Более быстрая реакция двигателя на изменение положения дроссельной заслонки.

5. Снижение шума двигателя.

При всех достоинствах систем впрыска топлива во впускной коллектор, возможности дальнейшего улучшения с помощью ее двигателя ограничены.

Двигатели с непосредственным впрыском бензина (GDI) имеют ряд преимуществ, которые не могут быть реализованы системами с впрыском во впускной коллектор:

- 1) отсутствие топливной пленки на стенках впускного коллектора;
- 2) улучшение точности соотношения воздух / топливо во время работы двигателя на переходных режимах;
- 3) снижение расхода топлива;
- 5) снижение выбросов CO₂ и NO_x;
- 6) снижение тепловых потерь;
- 7) повышение производительности двигателя;
- 8) улучшение работы двигателя при холодном запуске.

На рисунке 1.1.1 представлена эволюция систем подачи топлива в двигатель.

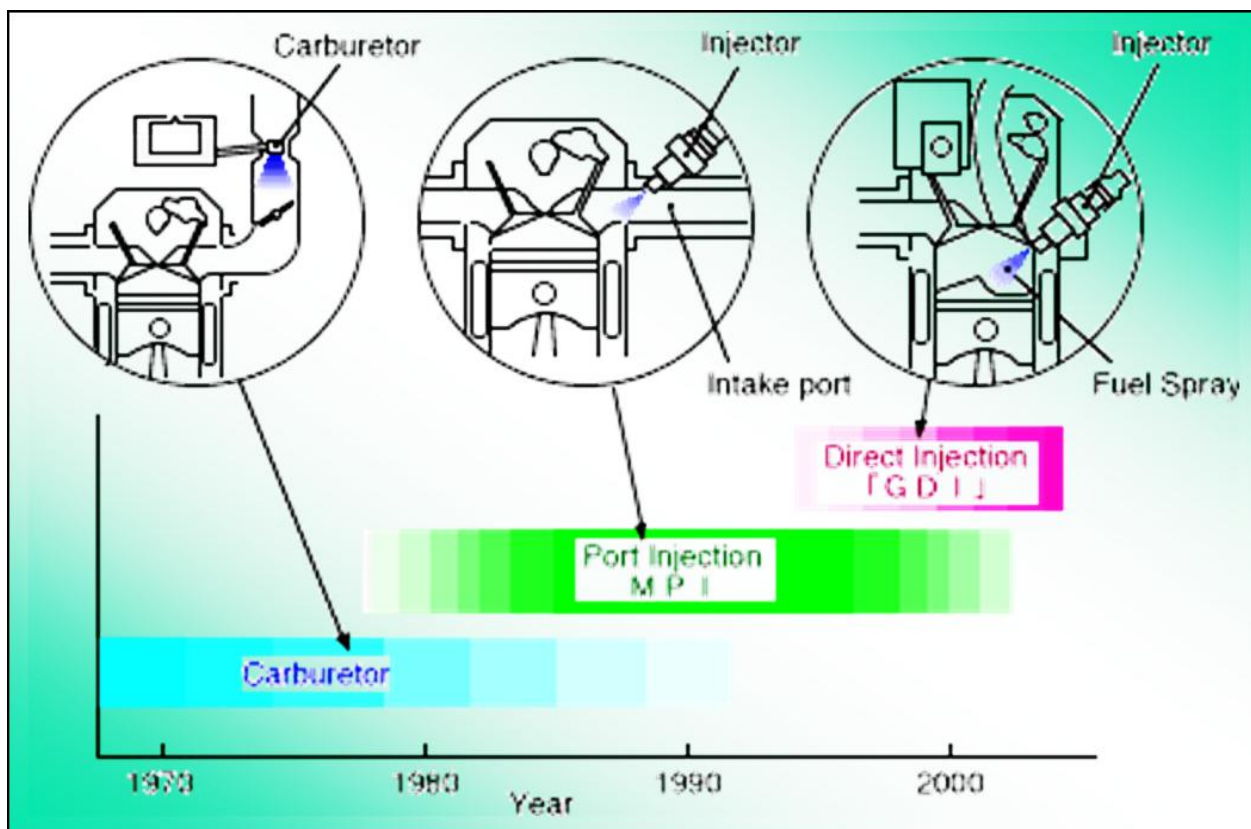


Рисунок 1.1.1 - Эволюция систем подачи топлива в двигатель

В таблице 1 приведены данные двух двигателей, автомобиля VW Passat 2009 года. Экономичность топлива в автомобиле с двигателем TSI на 18% ниже, чем у двигателя PFI. Выброс CO₂ на 12% ниже, чем у двигателя PFI. Хотя объем двигателя TSI меньше, чем у двигателя PFI, мощность и крутящий момент выше на 20% и 35% соответственно (таблица 1).

Engine Type	Swept volume	Max. Power	Max. Torque	Mixture formation system	Fuel economy (urban driving) L/100km	Fuel economy (highway driving) L/100km	CO ₂ emission g/km
Gasoline engine	1.6 L	75 kW 5600 1/min	148 Nm 3800 1/min	PFI (port fuel injection)	10,5	6,0	179
TSI gasoline engine	1.4 L	90 kW 5000 - 5500 1/min	200 Nm 1500 - 4000 1/min	GDI (Gasoline direct injection)	8,6	5,5	157

Таблица 1. Сравнение двигателей GDI и PFI

Известно, что концентрация CO изменяется в зависимости от коэффициента избытка воздуха. При сжигании богатых смесей наблюдается высокое содержание CO в продуктах сгорания. Поскольку двигатели GDI работают с обедненной смесью при частичных нагрузках и стехиометрической смеси при полной нагрузке, поэтому данный тип двигателей имеет низкие выбросы CO.

В двигателе GDI из-за контакта поршня и стенок цилиндра с топливом наблюдается рост эмиссии HC. Выбросы HC зависят от температуры двигателя и, следовательно, могут возрастать при холодном запуске. Характеристики холодного запуска варьируются в зависимости от впрыска топлива, движения воздуха в цилиндре, испарения топлива.

Во время холодного запуска двигателя GDI можно использовать гомогенную ТВС, что приводит к сокращению времени отжига катализатора и снижению выбросов HC.

Известно, что бензиновые двигатели обычно имеют низкие выбросы сажи, поскольку выделение сажи происходит в очень богатых смесях. Однако двигатели GDI образуют сажу, так как в цилиндре двигателя имеются области с очень богатыми смесями.

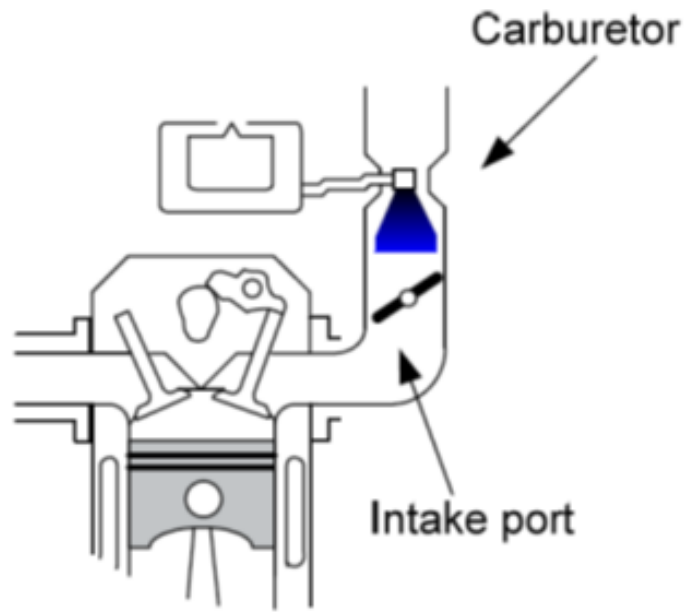
Выбросы NOx максимальны при высоких температурах цилиндра и при $\alpha = 1,1$. По мере увеличения крутящего момента температура в камере сгорания повышается, в свою очередь, выбросы NOx в двигателе увеличиваются. Отмечено, что выбросы NOx повышаются, особенно при полной нагрузке.

Экологическое законодательство определяет пределы выбросов токсичных компонентов в выхлопных газах двигателей с искровым зажиганием. Необходимо, чтобы токсичность выхлопных газов соответствовала этим пределам. Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор обеспечивает снижение CO, HC и NOx в двигателе при $\alpha = 1$. Но NOx нельзя полностью нейтрализовать при работе двигателя с обедненной смесью. Поэтому при ра-

боте двигателя на обедненной смеси также требуется наличие специального каталитического нейтрализатора для NOx.

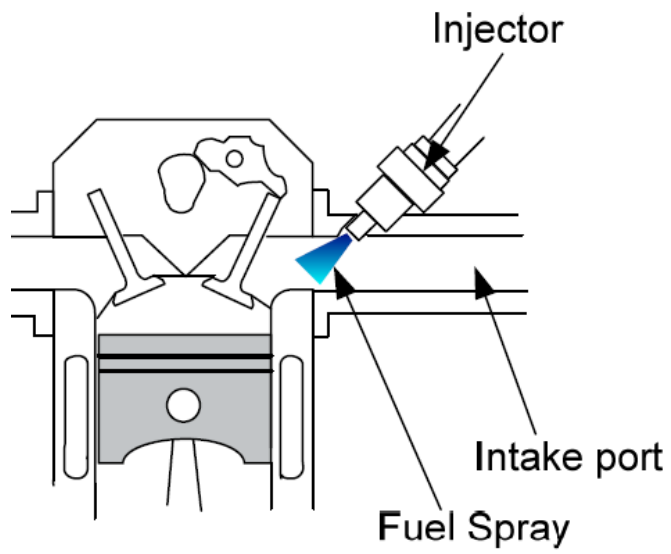
В выхлопной системе двигателя GDI используют два каталитических нейтрализатора. Один представляет собой предварительный каталитический катализатор (TWC). Другой - основной каталитический нейтрализатор, который имеет NOx-катализатор и TWC. Основной катализатор имеет больший объем, чем предварительный каталитический катализатор, и находится вдали от двигателя. TWC-катализатор нейтрализует CO, HC и NOx до безвредных газов (CO₂, H₂O и N₂) при $\alpha = 1,0$. Однако, когда двигатель работает с обедненной смесью, NOx не может быть превращен в азот. В таких случаях NOx отправляется в основной каталитический нейтрализатор [5]. В каталитическом катализаторе типа NOx, такие компоненты как Ba и Ca, используются для нейтрализации NOx. Оксиды азота реагируют с оксидом бария (BaO) и, таким образом, образуется нитрат бария Ba(NO₃)₂. Нитрат бария реагирует с CO и в результате этого образуются BaO и NO (этап высвобождения NOx). Для снижения эмиссии NOx помимо каталитического нейтрализатора также используют систему рециркуляции отработавших газов (EGR) [2].

Топливоздушная смесь в бензиновых двигателях может быть приготовлена как в цилиндре, так и вне цилиндра. В бензиновых двигателях с прямым впрыском ТВС готовится в цилиндре, рисунок 1.1.2.



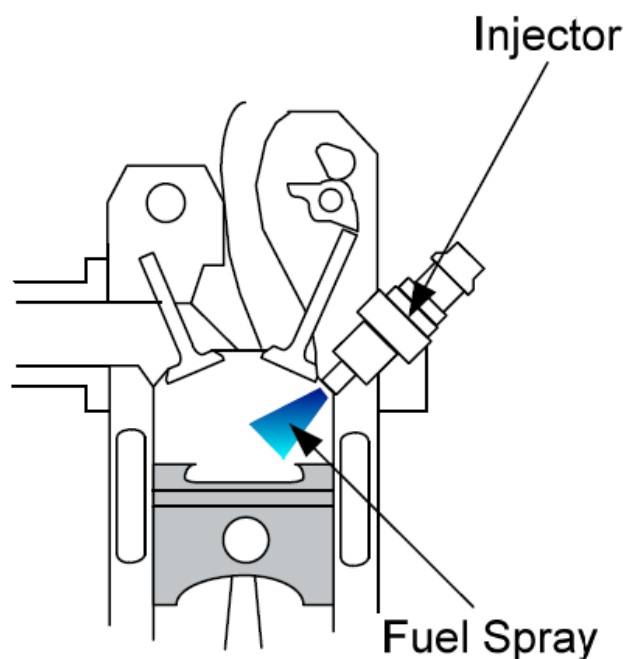
Carburetor

a



Port Fuel Injection

b



Direct Injection

6

Рисунок 1.1.2 - Образование ТВС в ДВС

В отличие от двигателей PFI, где топливо впрыскивается через впускной коллектор, в двигателях GDI топливо впрыскивается непосредственно в цилиндры под высоким давлением. Во время впрыска топлива, воздух поступает в цилиндр двигателя из открытого впускного клапана. Это обеспечивает лучший контроль процесса впрыска особенно в момент времени, когда впускные клапаны закрыты. Использование впускного коллектора в качестве камеры приготовления топливовоздушной смеси является преимуществом двигателей PFI. Из-за нехватки времени на испарение и смешение топлива с воздухом, в двигателях GDI топливо впрыскивается в цилиндр при очень высоком давлении. В двигателе PFI в зоне впускного клапана образуется топливная пленка, что вызывает задержку испарения топлива. Особенно при холодном запуске необходимо увеличить количество топлива для создания стехиометрической смеси. Это приводит к увеличению выбросов СН во время

холодного запуска. Впрыск топлива непосредственно в камеру сгорания лишен таких проблем, как увеличение концентрации НС и подача избыточного топлива в двигатель.

Для двигателей GDI реализованы два основных режима заряда: разделенный и однородный топливный заряд. В условиях частичной нагрузки используется разделенный заряд, то есть топливо впрыскивается во время такта сжатия. Гомогенный заряд является предпочтительным для условий с более высокой нагрузкой. Во время работы с однородным зарядом регулирование нагрузки двигателя осуществляется дросселированием, а во время работы с разделенным впрыском нагрузка регулируется коэффициентом избытка воздуха.

На рисунок 1.1.3 показаны гомогенный режим (ранний впрыск) и режим разделения заряда (поздний впрыск).

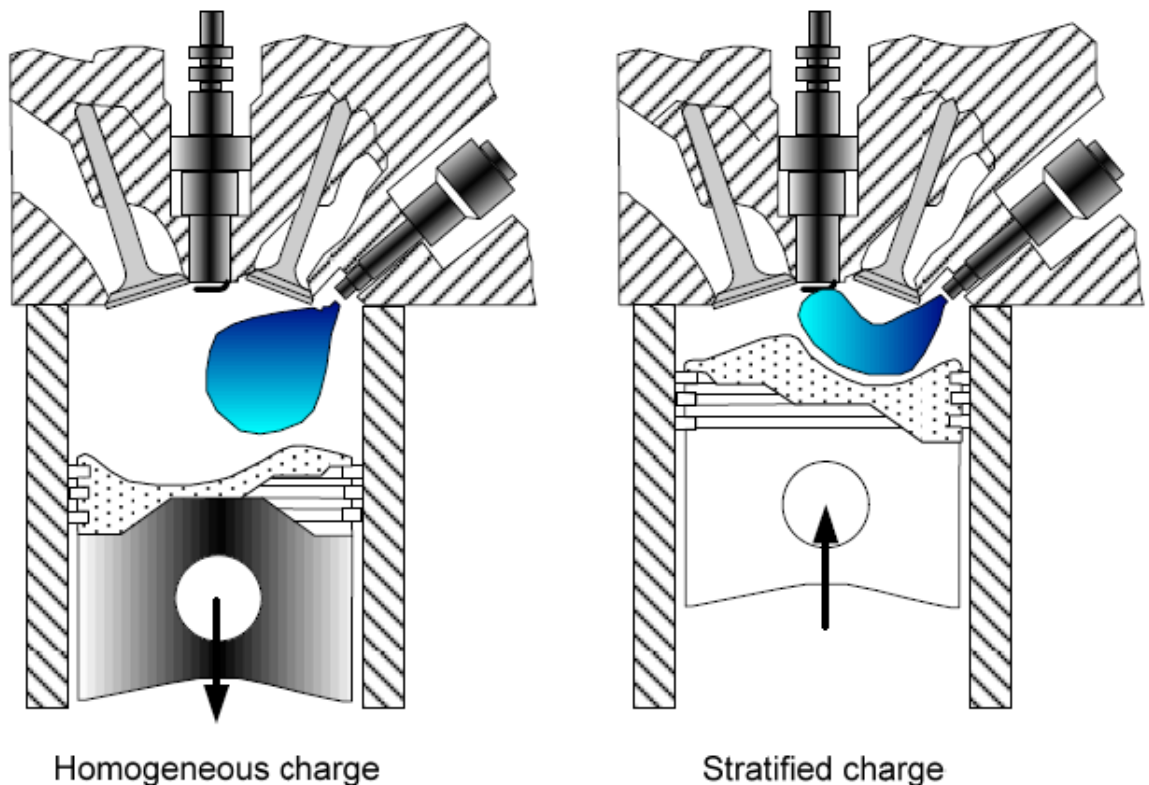


Рисунок 1.1.3 - Способы подачи топлива в камеру сгорания: а) однородный топливный факел, б) разделенный впрыск.

При разделенном впрыске используются три способа образования горючей смеси вблизи свечи зажигания. В частности, поверхностью стенки, воздушным потоком и топливным факелом, рисунок 1.1.4.

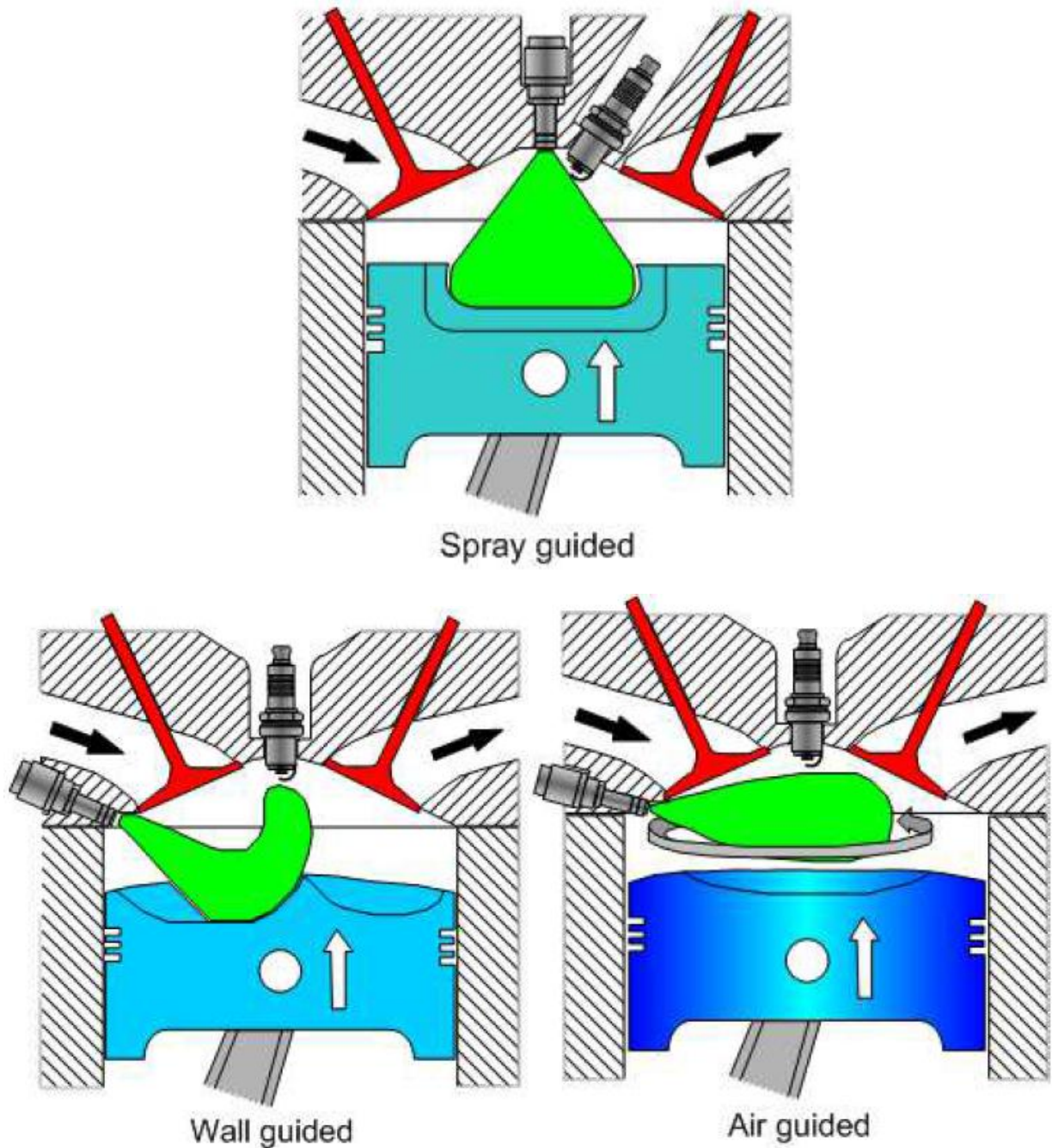


Рисунок 1.1.4 - Способы образования горючей смеси вблизи свечи зажигания: а) топливным факелом; б) поверхностью стенки; в) воздушным потоком

Стоит отметить, что в реальных условиях разделение заряда происходит при воздействии всех трех способов.

При образовании горючей смеси с помощью поверхности стенки топливный факел транспортируется к свече зажигания с помощью поршня специальной формы. Когда топливо подается на поверхность поршня, оно не может полностью испариться и, в свою очередь, увеличиваются выбросы HC и CO , а также растет расход топлива. Поэтому использовать данную систему неэффективно.

При образовании горючей смеси с помощью воздушного потока: топливо впрыскивается в воздушный поток, который перемещает топливный факел к свече зажигания. Воздушный поток формируется впускными клапанами со специальной формой, а скорость потока контролируется воздушными перегородками во впускном коллекторе. При этом топливо не попадает на поверхность поршня и цилиндра.

Например, система с непосредственным впрыском компании Volkswagen представляет собой комбинацию двух способов подвода горючей смеси к свече зажигания: стенкой и потоком воздуха, поэтому данная система менее чувствительна к циклическим изменениям воздушного потока. Топливо впрыскивается в поршень под заданным углом. Поршень имеет две чаши. Топливная чаша находится на стороне впуска; воздушная чаша находится на стороне выпуска. Топливо направляется одновременно через воздушную и топливную чашу на свечу зажигания, рисунок 1.1.5.

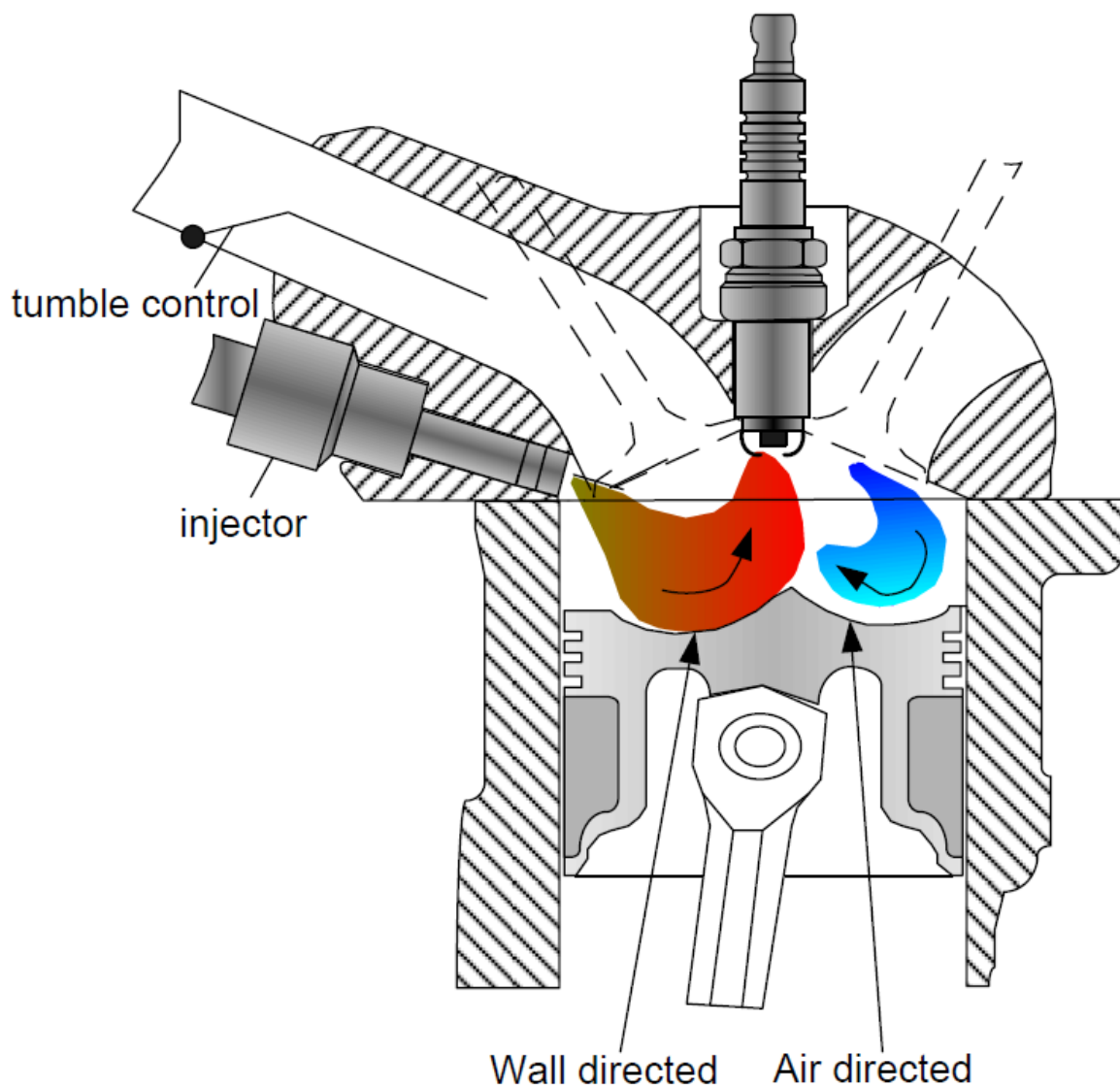


Рисунок 1.1.5 - Система образования горючей смеси на двигателе Volkswagen FS [4]

Система подвода топлива топливным факелом заключается в распылении топливовоздушной смеси вблизи свечи зажигания. Данный метод подвода топлива имеет следующие преимущества: топливо не соприкасается со стенками камеры сгорания, меньшая чувствительность к циклическим изменениям скорости потока воздуха в цилиндре, меньшая чувствительность к межцикловой неидентичности рабочих процессов, низкие значения НС. Недостатком данной системы является: загрязнение свечей зажигания и как следствие возможные проблемы с поджигом горючей смеси.

Таким образом, обзор литературы показал следующее:

1) система непосредственного впрыска топлива имеет хорошие перспективы улучшить экологические и энергетические характеристики современных поршневых ДВС;

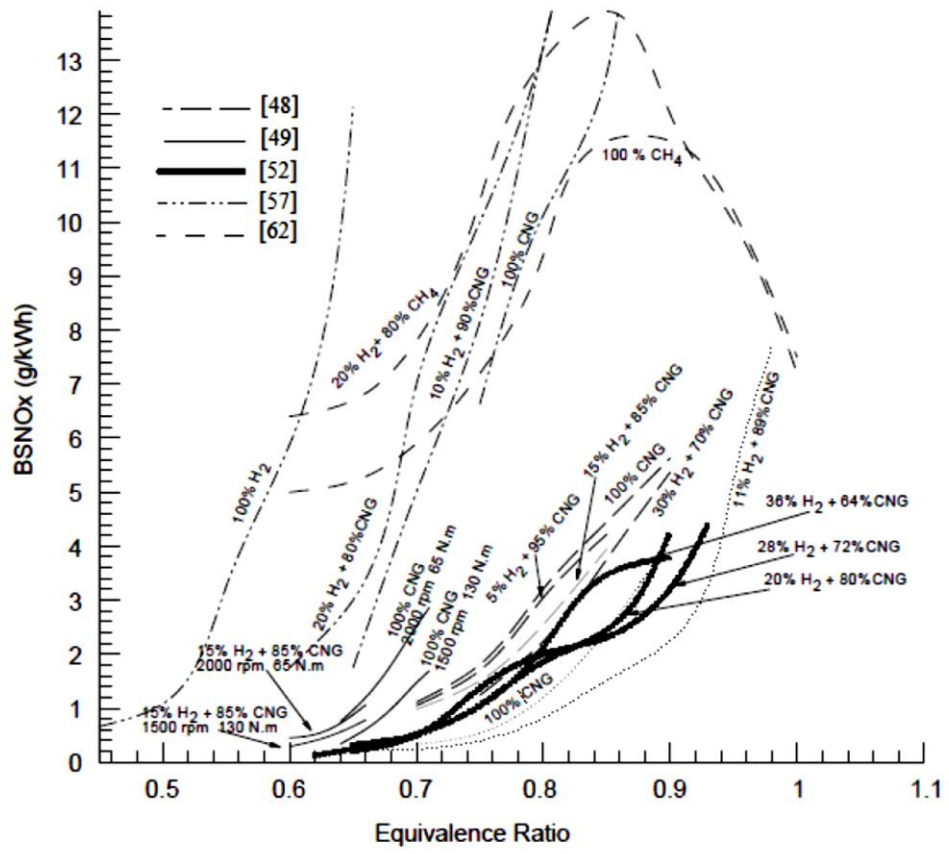
2) отсутствие современных отечественных исследований в области применения непосредственного впрыска топлива;

3) основная причина улучшения показателей GDI двигателей заключается в воздействии на скорость распространения пламени за счет изменения коэффициента избытка воздуха по объему камеры сгорания.

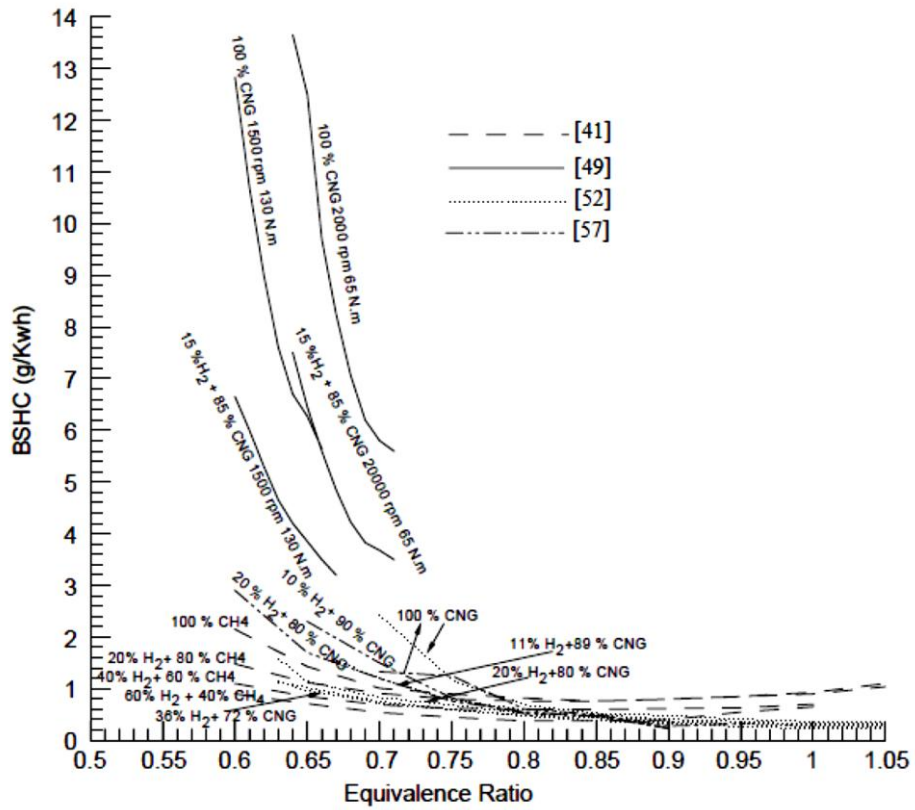
1.1.2 Использование композитных топлив

Растущий интерес к композитным видам топлива для легковых и грузовых автомобилей обусловлен тем, что композитные виды топлива, как правило, дают меньше выбросов, а также позволяют повысить энергетическую независимость и безопасность государства. Одним из наиболее перспективных композитных топлив является *hythane* - смесь природного газа с водородом.

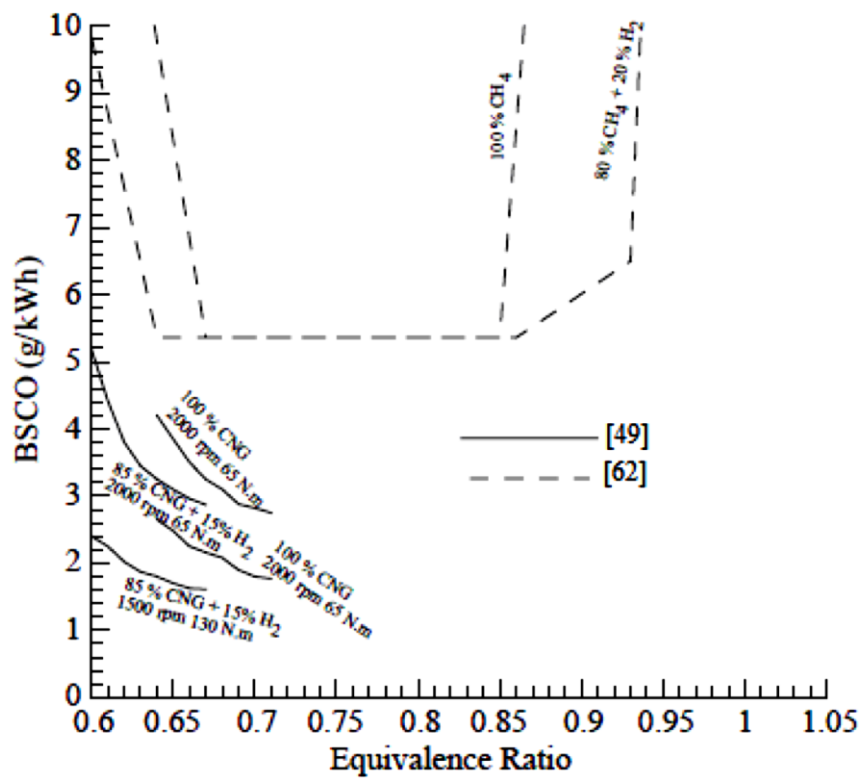
В настоящее время во всех ведущих странах мира (США, Индии, Норвегии, Канаде, России и т.д.) ведутся активные исследования в данной области. В результате многочисленных исследований было выявлено, что использования *hythane* приводит к снижению токсичности ОГ, увеличению давления в КС и КПД двигателя, рисунки 1.1.6.



a



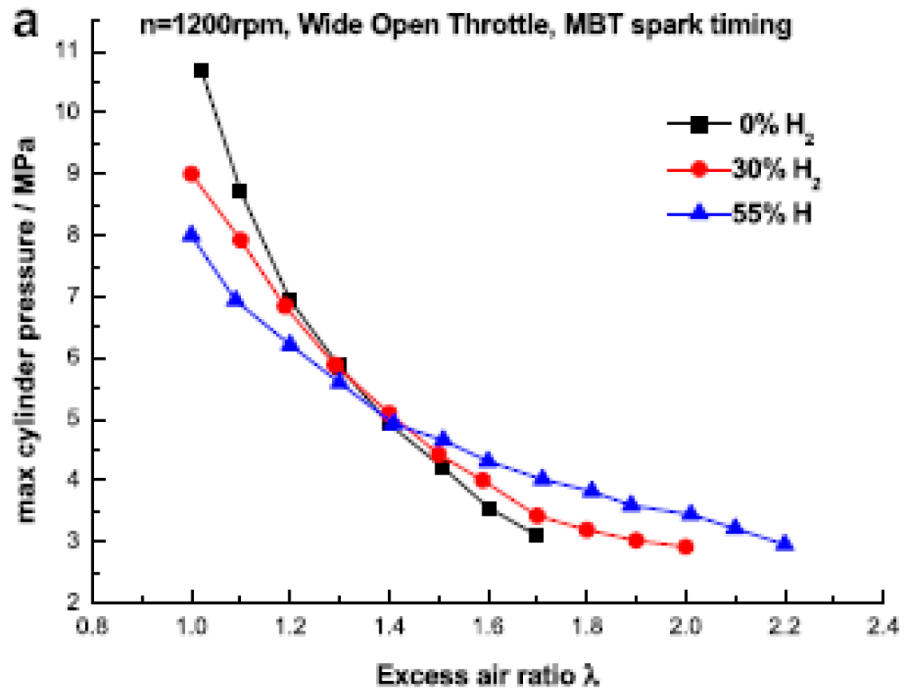
b



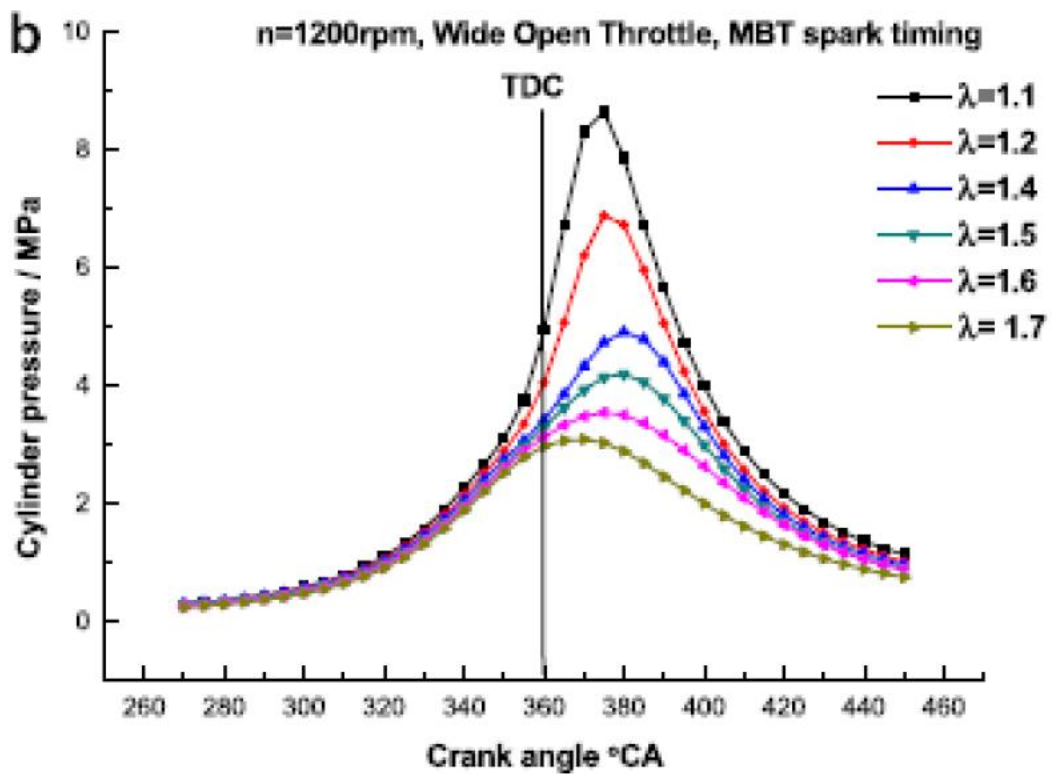
в

Рисунок 1.1.6 - Токсичность ОГ двигателя на смеси ПГ с водородом (HCNG):

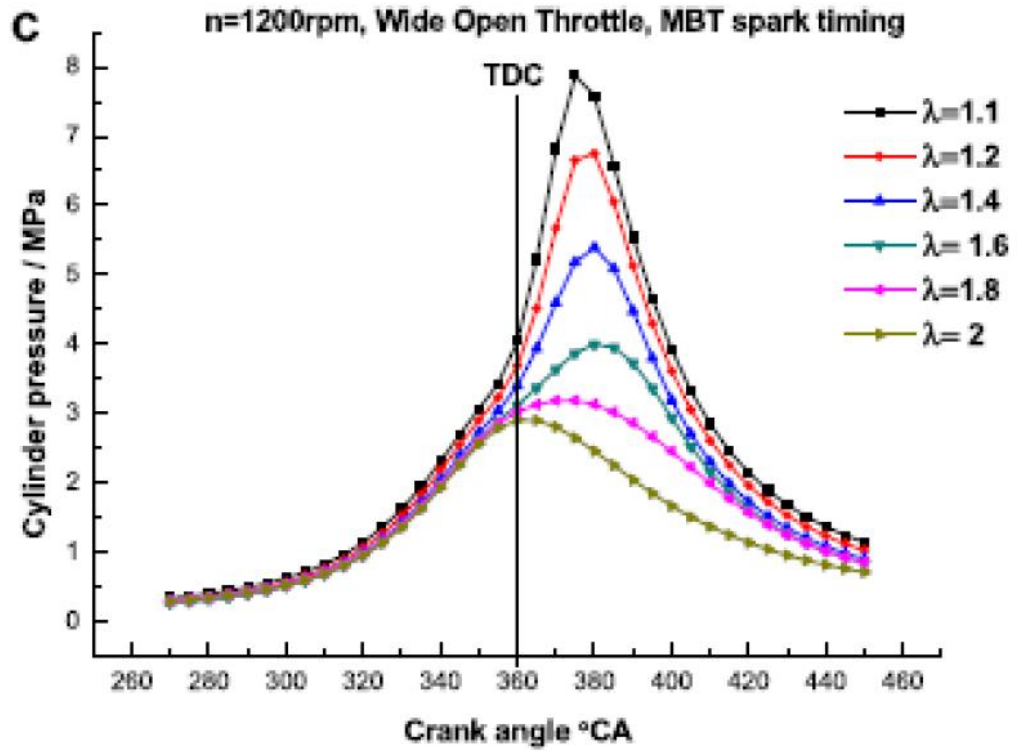
а) NO_x б) CH в) CO [29]



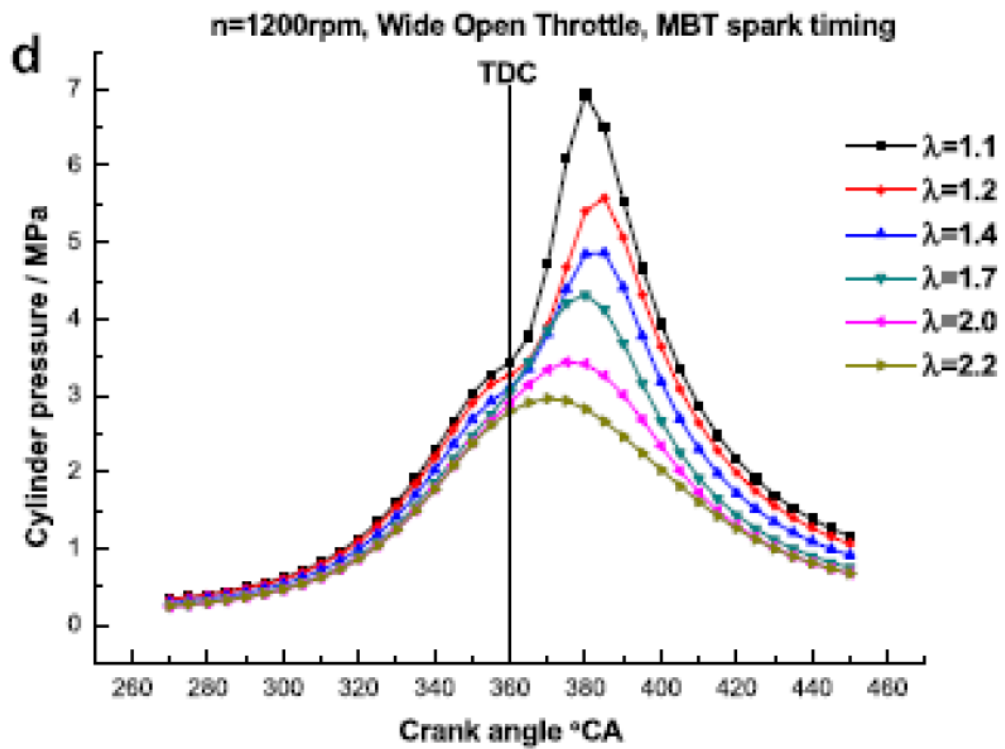
a



b



B



Г

Рисунок 1.1.7 - Давление в КС двигателя на смеси ПГ с водородом

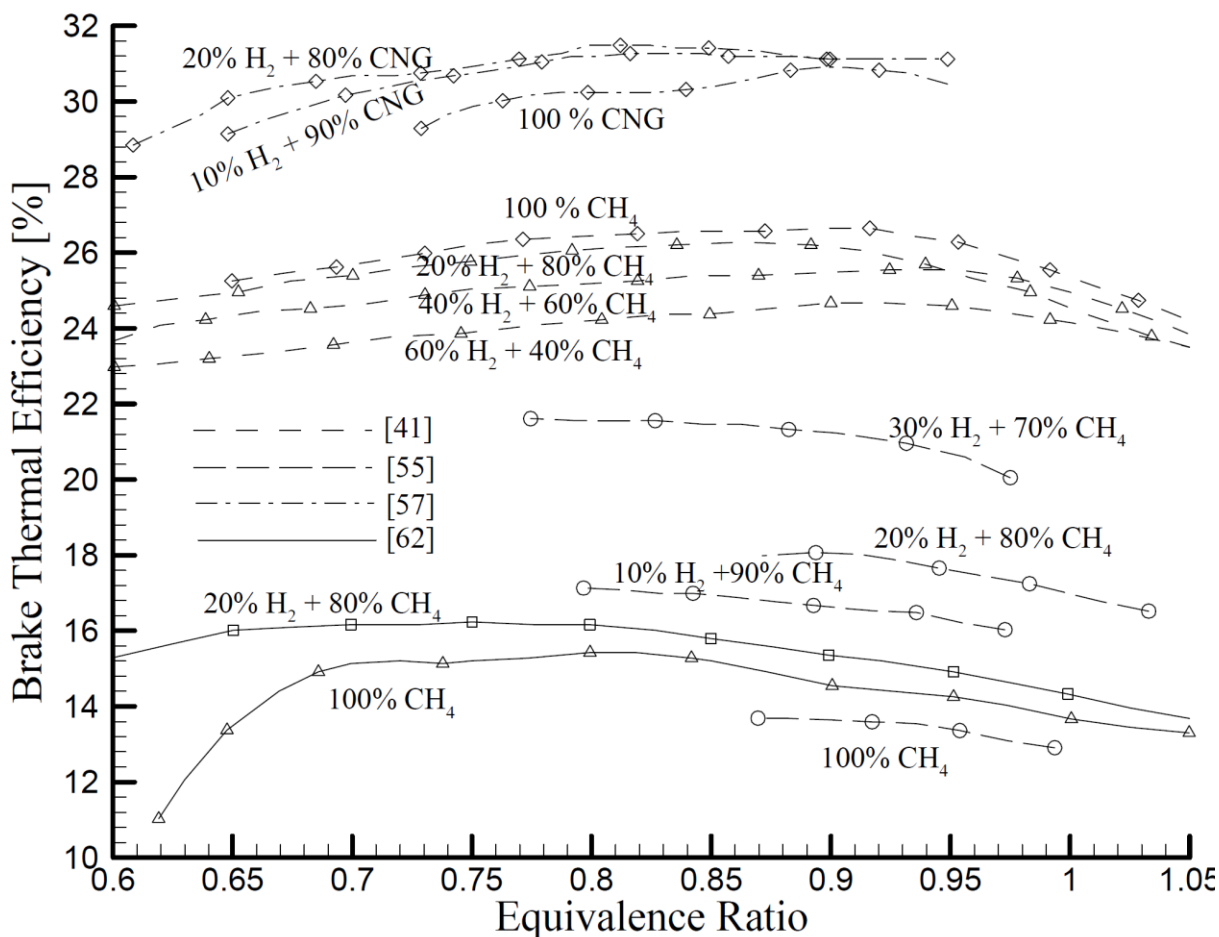


Рисунок 1.1.8 - КПД двигателя на смеси ПГ с водородом (HCNG)

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что воздействие на свойства углеводородного топлива с помощью добавок водорода оказывает позитивное воздействие на экономические и экологические характеристики поршневого двигателя.

1.2 Обзор методов изучения процесса сгорания в цилиндре поршневого ДВС с искровым зажиганием

Основная информация о процессе сгорания в камере сгорания двигателя: скорость горения (нормальная и турбулентная), состав выхлопных газов, скорость выделения тепла, конфигурация фронта пламени, давление и температура. Поэтому при выборе инструментов исследования процесса сгорания

необходимо исходить из возможности получения этих характеристик. Кроме того, учитывая, что процесс горения в ДВС занимает очень мало времени, поэтому инструменты должны иметь почти полную безинерционность. В настоящее время существует множество методов, которые позволяют исследователю предоставить необходимую информацию о процессе горения в двигателе внутреннего сгорания, рисунки 1.2.1 – 1.2.5.

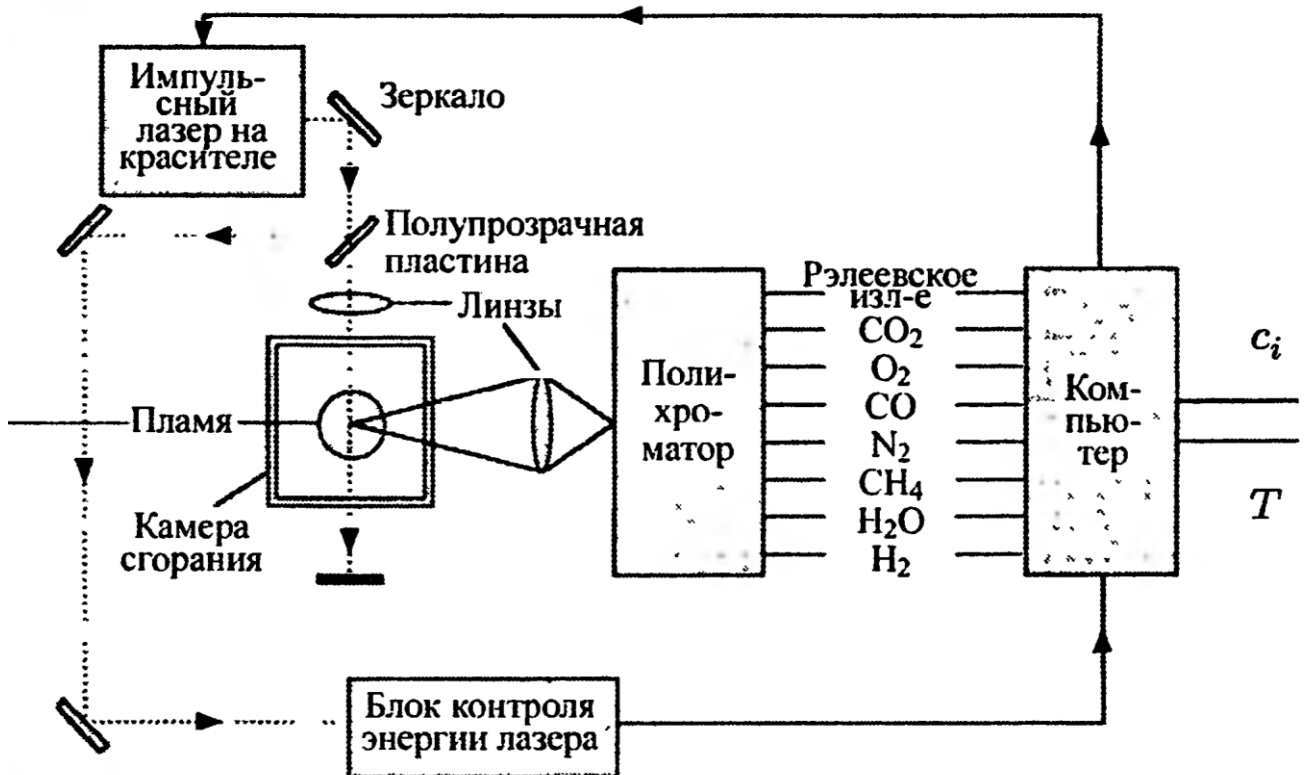


Рисунок 1.2.1 - Установка для определения концентрации и температуры при помощи рамановской и рэлеевской спектроскопии

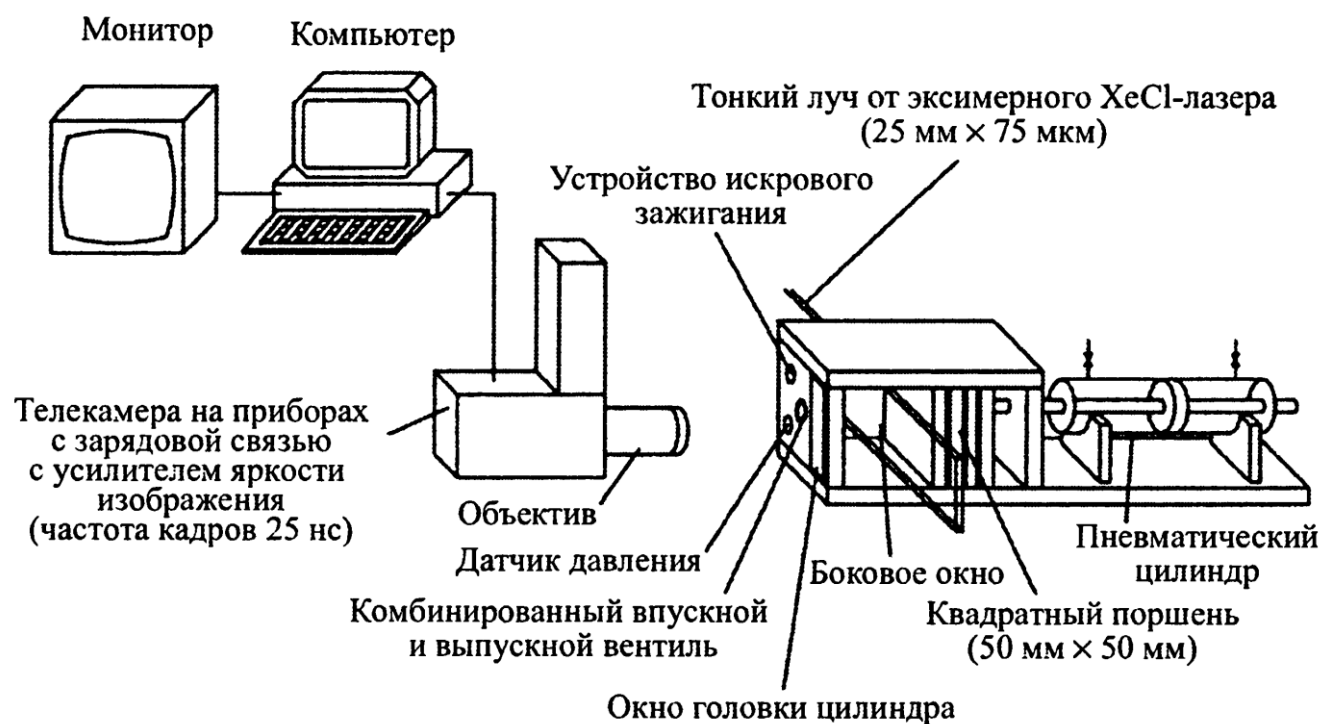


Рисунок 1.2.2 - Экспериментальная установка ЛИФ-спектроскопии

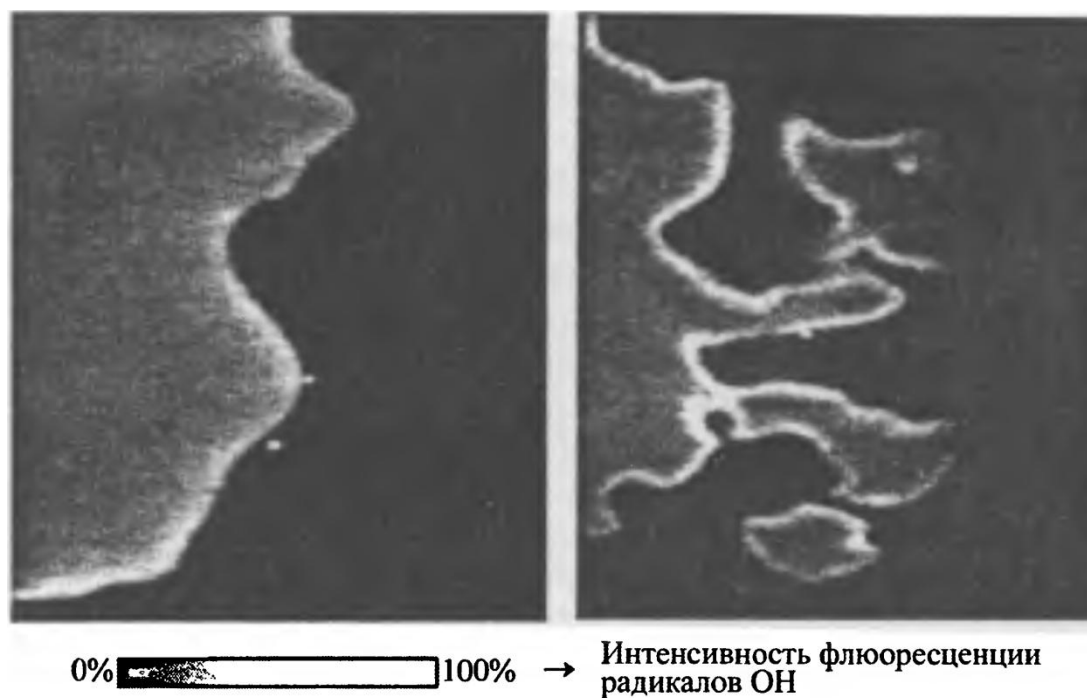


Рисунок 1.2.3 - Измерения ЛИФ радикалов ОН двумерным световым потоком

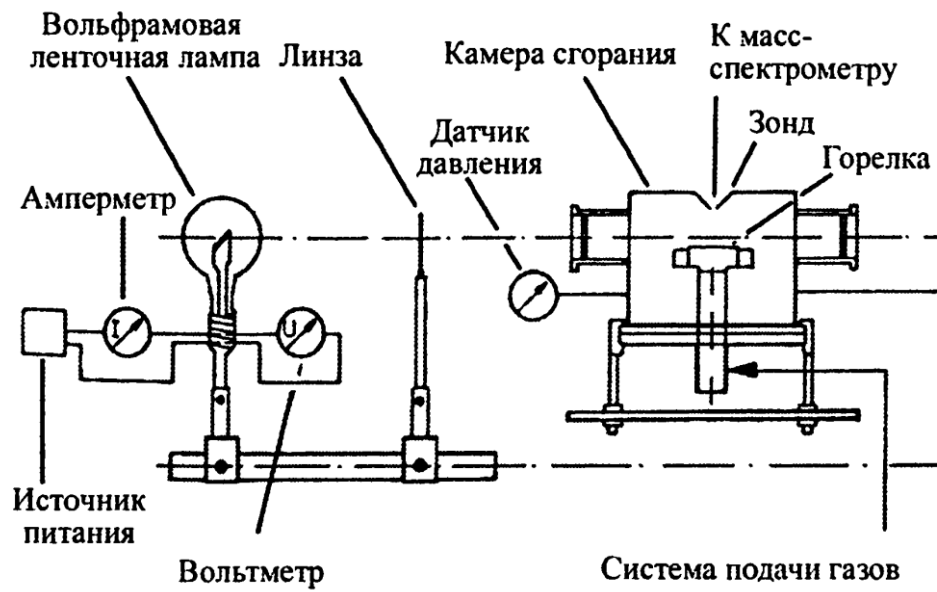


Рисунок 1.2.4 - Экспериментальный стенд измерения температуры пламени

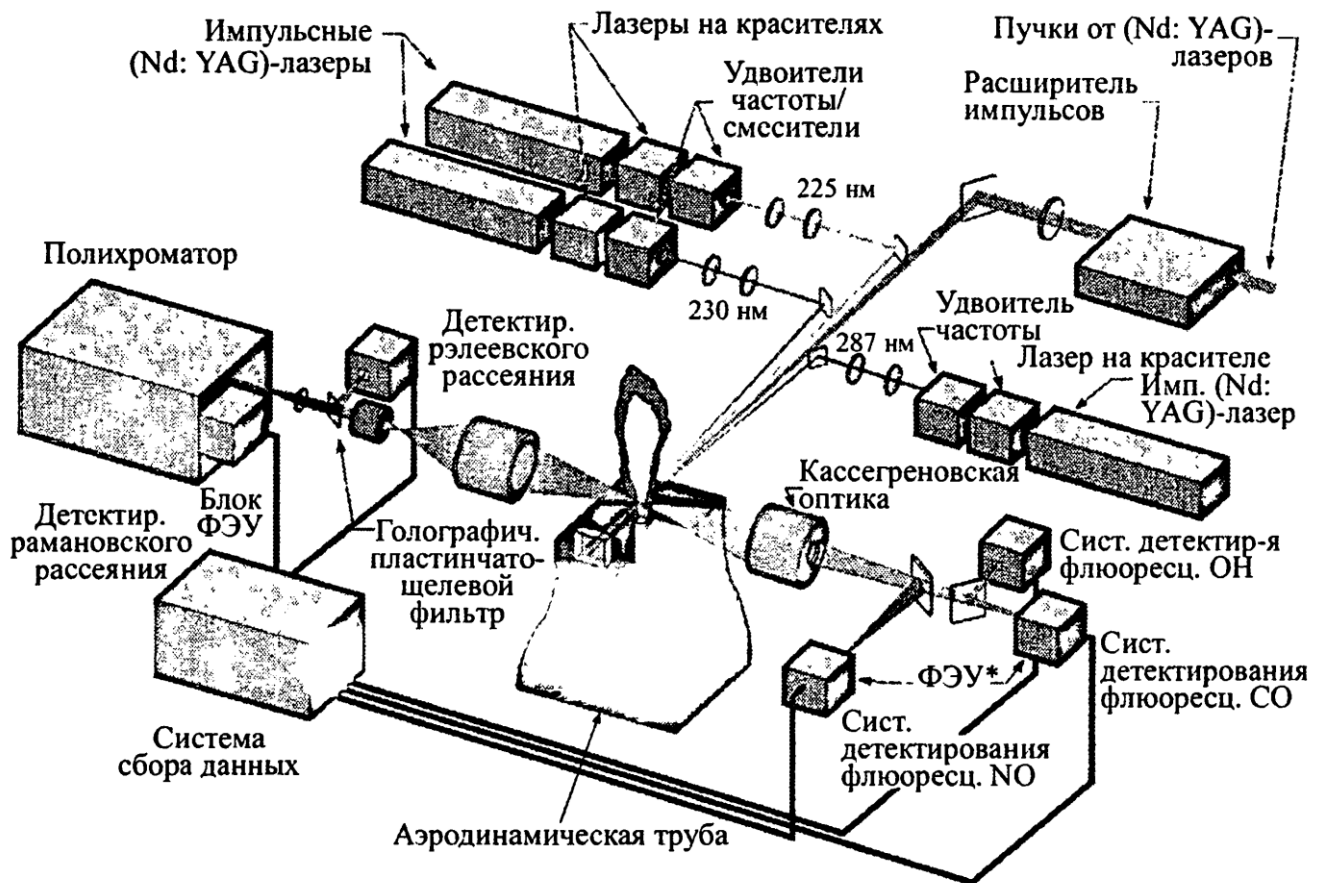


Рисунок. 1.2.5 - Экспериментальный стенд измерения температуры и концентрации частиц в пламени

Кроме рассмотренных выше методов исследования пламени, в последнее время достаточно популярны методы зондового исследования процесс сгорания композитного топлив в ДВС. В частности используются ионизационные датчики, рисунок 1.2.6

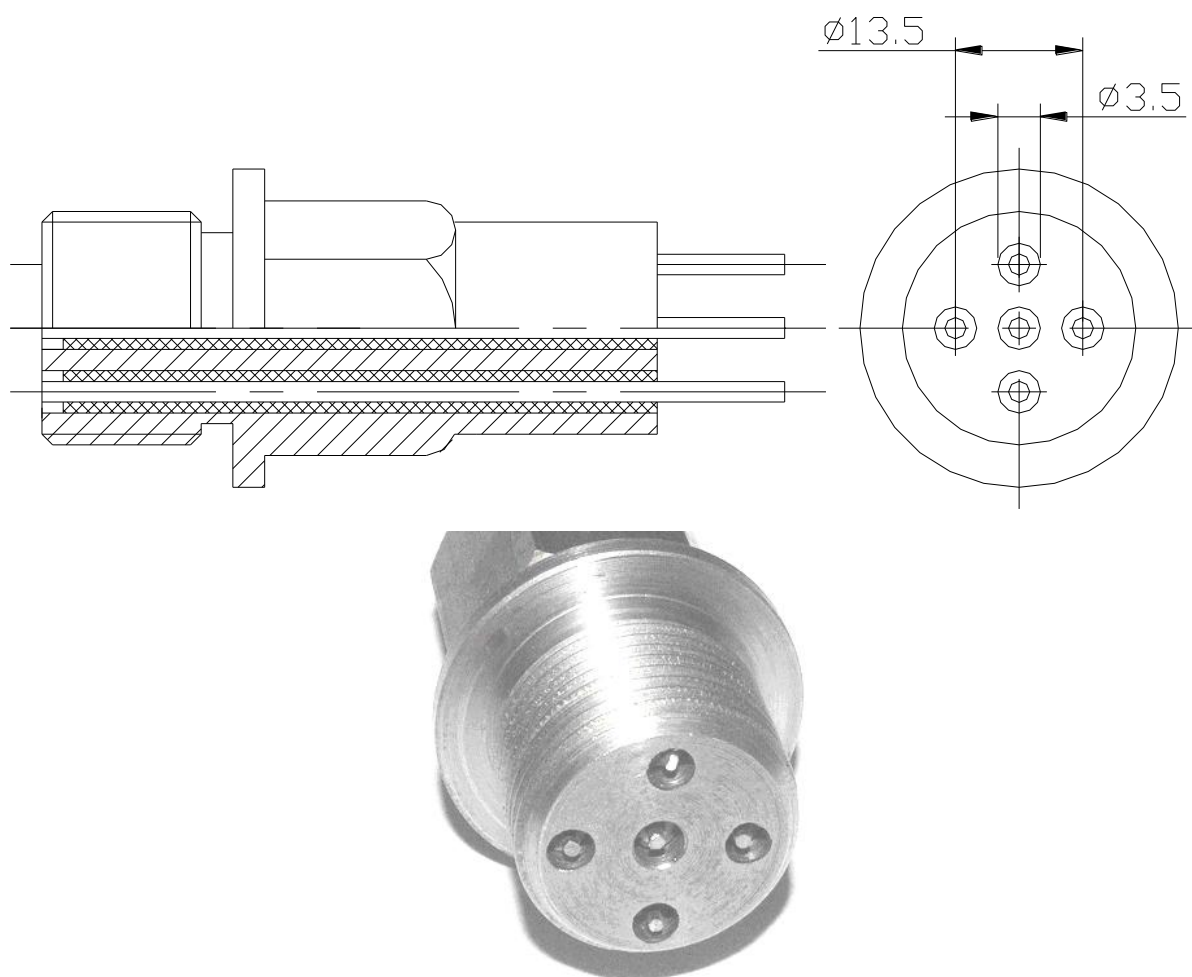


Рисунок 1.2.6 - Пяти электродный ионизационный датчик: а) рисунок, б) фотография.

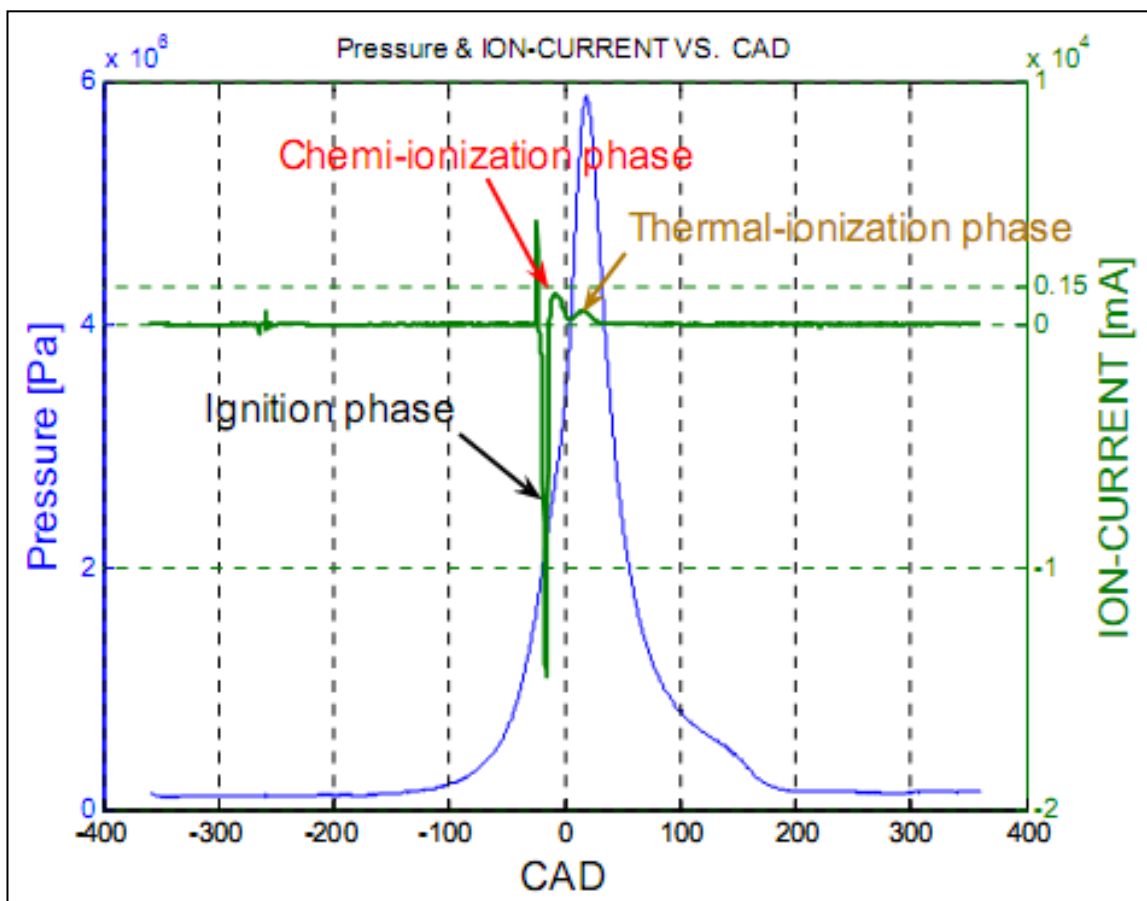
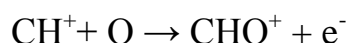


Рисунок 1.2.7 – Значения термо- и хемо- ионизации и угол поворота КВД.

Главной исходной реакцией, ответственной за ионизацию в пламени углеводородного топлива, является реакция:



Формирование иона CHO^+ в процессе горения приводит к возникновению разнообразных заряженных частиц: ионов и электронов. Изучение ионного состава пламени выявили в пламени до 50 разновидностей положительных ионов, основными из которых, помимо CHO^+ , ионы C_3H_4^+ и H_3O^+ .

Таким образом, ионизация ЗХР пламени имеет связь с ионами CH^+ и O , которые образуются в результате реакций, происходящих в ЗХР пламени. Тепловая ионизация в продуктах сгорания двигателя может быть представлена в виде реакцией:



Энергия требуемая для данной реакции берется из тепла продуктов сгорания. Обнаружено, что значение термоионизации сильно зависит от концентрации NO, рис. 1.7 [61, 69].

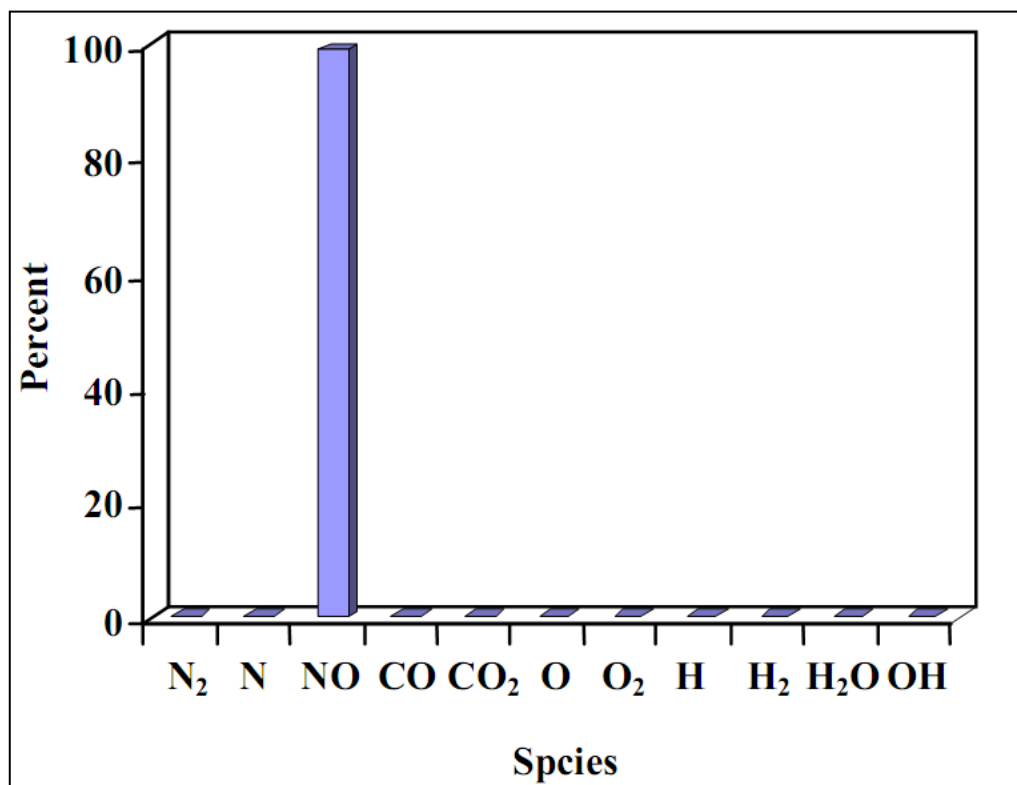


Рисунок 1.2.8 – Вклад основных видов ионов в значение ионного тока.

По видимому, это объясняется тем, что именно концентрация NO определяет значение термоионизации, из-за незначительной энергии ионизации оксида азота, что показано в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Энергия ионизации частиц в области отработавших газов

Частицы	Энергия ионизации (eV)
NO	9.26405
CO	14.0139
CO ₂	13.777
N ₂	15.5808
H ₂	15.42589

В течении процесса термоионизации ионы и электроны находятся в состоянии термодинамического равновесия и, таким образом, описываются уравнением Саха.

В настоящее время имеется много методов определения параметров электропроводности пламени. Самым простым и дешевым является метод ионизационных зондов (ИЗ).

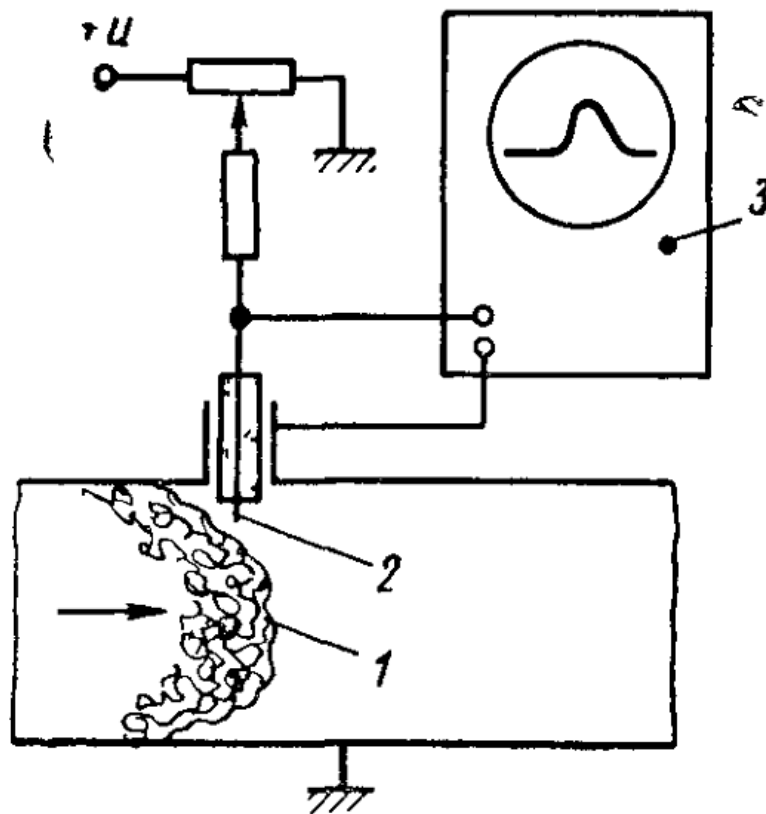


Рисунок 1.2.9 – Схема ионизационного метода

Таким образом, согласно литературе, было обнаружено, что в настоящее время существует много методов изучения процесса горения в двигателе с искровым зажиганием. Одним из наиболее простых и дешевых способов исследования пламени является использование ионизационных датчиков. Однако стоит отметить, что и ионизационные датчики имеют ограничения, которые не позволяют с помощью них получить всю информацию о процессах в камере сгорания ДВС. Совершенствование данного метода в долгосрочной

перспективе позволит исследовать большее количество характеристик пламени.

Выводы к главе I

1. Обзор литературных данных показал, перспективность использования ионизационных зондов для исследования процесса сгорания топлива в ДВС с искровым зажиганием.

2. Отсутствие данных о влиянии пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени в условиях поршневого ДВС.

3. Отсутствие данных о взаимосвязи концентрации несгоревших углеводородов с шириной зоны турбулентного горения при сгорании топливно-воздушной смеси с добавкой водорода.

Таким образом, задачи исследования:

1. Изучить связь ионного тока со скоростью распространения и шириной ЗХР пламени при изменении коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в топливе и частоты вращения коленчатого вала двигателя.

2. Определить влияние пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени.

3. Выявить связь концентрации несгоревших углеводородов с протяженностью зоны химических реакций.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовательское оборудование и методика проведения экспериментов подробно изложены в работе ученых ТГУ. В частности, в работах приводятся следующие данные: исследовательская установка состоит из поршневой моторной установки УИТ-85, которая представляет собой карбюраторный двигатель с изменяемой степенью сжатия; камера сгорания установки - плоскооцеального типа; электродвигатель приводит во вращение коленчатый вал; имеется два скоростных режима: 600 и 900 об/мин. Конструкция моторной установки позволяет точно регулировать рабочие характеристики ДВС (коэффициент избытка воздуха, степень сжатия, скорость вращения КВД, температура охлаждающей жидкости, время зажигания).

Эти конструктивные особенности снижают неоднородность состава ТВС при сгорании, и таким образом, изучить воздействие конкретной величины на динамику процесса сгорания топлива в поршневом ДВС с искровым зажиганием, вредность отработавших газов, следовательно, используемая поршневая моторная установка с искровым зажиганием и электродвигателем вполне может воспроизводить нужные условия испытаний и, таким образом, применена для изучения горения композитного топлива, для контроля электропроводности пламени. На рисунках (см. приложение В) показано применяемое оборудование.

Методика экспериментов, подробно описанная в работах авторов из ТГУ [16-29]. В частности переменные факторы в эксперименте были следующими: топливная смесь ($0,7 < \alpha < 1,4$), массовая доля водорода, скоростной режим ДВС ($600 \text{ мин}^{-1} < n < 900 \text{ мин}^{-1}$) экспериментальные результаты были использованы для построения характеристик коэффициента избытка воздуха с различными изменениями переменных, которые учитывают параметры горения отмечены изменения, которые приводят к изменению концентрации

несгоревших углеводородов, кроме того, в процессе испытаний доказано, что УИТ-85 измеряет следующие значения: скорость двигателя, вес топлива, воздух и водород, УОЗ, давление, концентрация несгоревших углеводородов, и параметры хемионизации.

По результатам опытов была проведена оценка погрешностей согласно ГОСТ Р 8.736-2011: «оценку измеряемой величины за которую принимают среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений, вычисляют по формуле» [27]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

где x_i – i -й результат измерений;

n - число исправленных результатов измерений.

«Среднее квадратическое отклонение S группы, содержащей результатов измерений, вычисляют по формуле» [27]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

«Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины) S_x вычисляют по формуле» [27]:

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Для исключения грубых погрешностей использовался критерий Граббса, который согласно ГОСТ Р 8.736-2011 «основан на предположении о том, что группа результатов измерений принадлежит нормальному распределению; для этого вычисляют критерии Граббса G_1 и G_2 , предполагая, что наибольший или наименьший результат измерений вызван грубыми погрешностями» [27]:

$$G_1 = \frac{|x_{\max} - \bar{x}|}{S}$$

$$G_2 = \frac{|\bar{x} - x_{\min}|}{S}$$

Затем шло сравнение G_1 и G_2 с теоретическим значением G_T критерия Граббса при выбранном уровне значимости q . Таблица критических значений критерия Граббса приведена в ГОСТ Р 8.736-2011.

Анализ осциллограмм выявил наличие нормального распределения вероятности, рисунок 2.1.

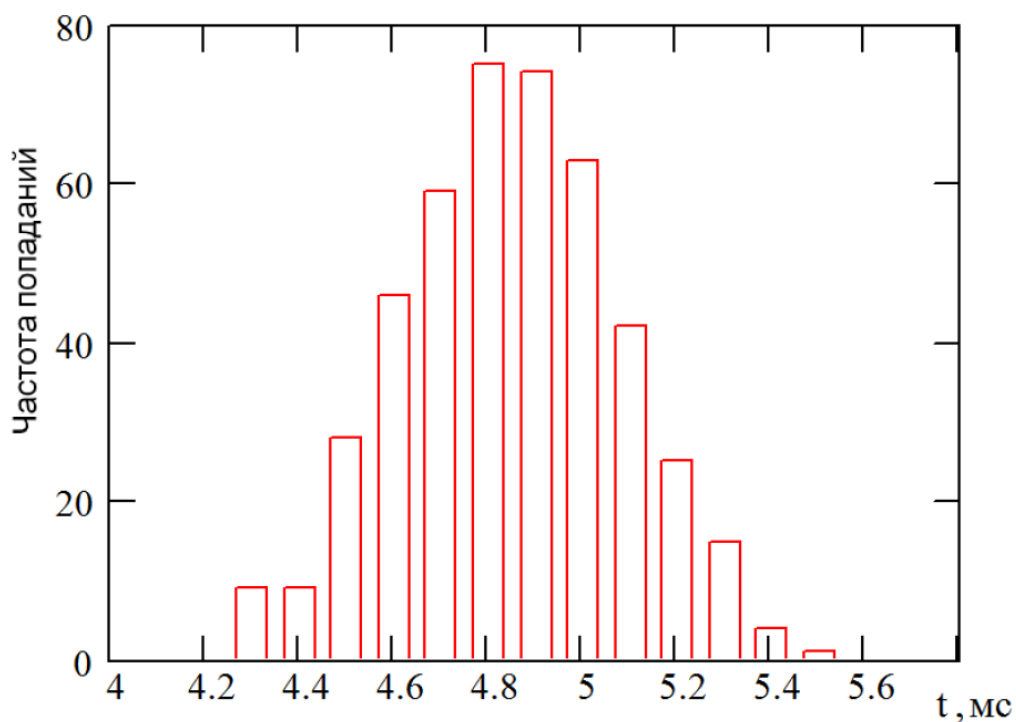


Рисунок 2.1 – Гистограмма распределения времени сигнала на датчике ионизации

Результаты расчета сведены в таблицу 2.1.

$n_{\text{МИН}}$ -1	УОЗ	α	H_2 , %	δU_o , %	δt_o , %	$\delta \tau_o$, %	$n_{\text{МИН}}$ -1	УОЗ	α	H_2 , %	δU_o , %	δt_o , %	$\delta \tau_o$, %
600	11	1,01	0	4,432	2,393	3,43	600	13	1,095	0	4,51	2,121	3,51
600	12	1,09	0	4,791	2,332	3,79	600	13	1,331	0	8,167	2,306	4,167
600	16	1,19	0	4,847	1,568	2,84	600	13	1,434	0	9,4	6,604	7,401
600	25	1,303	0	4,879	2,069	3,87	600	13	1,248	0	7,75	1,893	3,75
600	28	1,393	0	7,973	1,923	4,973	600	13	1,033	0,67	4,706	1,453	3,706
600	21	1,299	1,042	4,975	2,498	2,975	600	13	1,209	0,82	6,172	2,156	4,172
600	25	1,382	0,979	8,548	2,148	5,548	600	13	1,345	0,916	6,653	2,65	3,653
600	15	1,189	0,998	7,253	1,768	4,253	600	13	1,48	1,01	7,202	4,79	6,202
600	10	1,089	1,102	8,339	3,022	3,339	600	13	1,463	2,49	7,482	2,431	7,482
600	10	1,029	1,041	6,363	1,993	2,363	600	13	1,31	2,21	6,135	2,092	3,135
600	23	1,391	2,008	6,086	2,697	3,086	600	13	1,19	2	4,035	2,273	3,035
600	21	1,289	2,070	5,723	3,113	5,723	600	13	1	1,67	3,43	1,725	2,43
600	10	1,027	2,112	9,413	3,106	4,413	600	13	1,163	3,28	5,521	2,004	3,521
600	16	1,223	2,084	7,804	2,163	2,804	600	13	1,072	2,81	4,308	1,942	2,308
600	9	1,133	2,049	5,762	1,638	3,762	600	13	1,611	2,75	11,8	4,16	7,832
600	9	1,072	2,811	4,246	1,943	2,246	600	13	0,89	2,89	4,355	2,422	3,355
600	9	1,116	2,935	4,911	1,99	2,911	600	13	1,2	3,45	4,874	1,462	4,874
600	14	1,209	3,038	7,386	2,093	4,386	600	13	1,34	2,8	9,77	2,69	4,77
600	20	1,294	3,107	5,551	1,995	3,551	600	13	1,397	3,6	6,422	2,053	3,422
600	9	1,019	2,931	3,409	2,529	3,409	600	13	1,062	3,91	4,483	1,498	2,483
600	22	1,402	3,086	7,234	3,892	4,985	600	13	1,545	4,06	7,175	4,703	5,175
600	8	1,102	3,977	3,782	2,694	3,782	600	13	1,119	5,07	5,1	2,05	3,173
600	19	1,316	4,021	3,187	2,046	3,687	600	13	1,723	4,65	7,515	3,473	5,515
600	13	1,199	4,004	4,638	2,662	4,938	600	13	1,264	4,98	5,54	2,931	3,54
600	9	1,009	4,082	3,11	1,95	3,711	600	13	1,533	5,08	9,88	2,466	5,88
600	21	1,398	3,959	7,767	2,602	4,767	600	13	1,378	5,02	4,6	1,7	3,622
600	23	1,494	3,954	8,761	3,994	5,761	600	13	1,487	6,23	9,66	5,833	7,66
600	10	1,099	5,007	3,563	2,25	2,563	600	13	1,65	5,64	7,4	2,415	4,413
600	12	1,208	4,980	8,827	2,208	4,827	600	13	1,046	5,72	4,713	1,947	2,713
600	18	1,311	4,906	7,075	2,543	3,075	600	13	1,23	6,19	4,408	1,834	3,408
600	8	1,008	4,917	4,518	3,055	4,118	900	13	0,961	0	4,116	1,801	2,116
600	20	1,400	4,959	7,588	2,462	3,588	900	13	1,098	0	4,422	2,285	2,422

600	22	1,503	5,020	8,8	4,538	6,802	900	13	1,300	0	8,307	3,646	4,307
600	17	1,322	6,096	6,274	2,254	3,274	900	13	1,209	0	7,025	2,627	3,025
600	11	1,214	6,015	2,264	2,238	2,264	900	13	1,423	0	9,46	1,377	3,46
600	9	1,096	5,937	4,609	1,905	3,609	900	13	0,976	0,854	3,65	2,005	3,651
600	8	1,020	6,082	5,751	1,772	3,751	900	13	1,127	0,989	4,478	2,291	3,478
600	19	1,409	6,064	8,643	5,414	6,643	900	13	1,248	1,143	6,35	2,222	3,35
600	21	1,485	5,923	8,151	3,05	5,151	900	13	1,330	1,219	7,328	2,69	4,328
600	25	1,615	6,032	9,909	4,153	7,909	900	13	1,321	2,517	5,93	2,425	4,93
600	13	0,953	0	3,723	1,699	3,023	900	13	1,197	2,267	4,162	2,2	3,162
900	13	1,091	2,057	3,87	1,933	3,187	900	10	1,007	0	4,181	1,982	2,181
900	13	0,997	1,872	3,183	1,718	2,183	900	13	1,123	0	4,321	2,154	2,321
900	13	1,441	2,759	9,7	3,342	5,754	900	23	1,206	0	4,726	1,555	2,726
900	13	0,991	3,066	4,252	2,149	4,252	900	27	1,315	0	5,449	2,02	3,449
900	13	1,097	3,421	3,752	1,658	3,752	900	32	1,394	0	4,891	1,853	2,891
900	13	1,137	2,807	3,563	1,61	3,563	900	10	0,995	1,039	3,077	2,117	3,077
900	13	1,274	3,046	6,216	2,35	3,216	900	12	1,096	0,981	4,158	2,635	3,158
900	13	1,219	3,837	4,258	1,505	2,258	900	22	1,203	1,039	4,86	1,887	2,86
900	13	1,342	4,264	6,122	3,13	4,122	900	30	1,402	1,014	5,056	1,984	3,056
900	13	0,999	4,292	5,312	1,821	3,312	900	26	1,296	1,015	5,947	1,9	3,947
900	13	1,452	4,649	6,65	2,95	4,615	900	12	1,092	2,021	3,142	1,591	2,142
900	13	1,548	4,994	9,234	4,204	6,234	900	9	1,009	2,013	3,811	2,084	3,811
900	13	1,231	5,406	5,8	2,44	3,882	900	28	1,423	2,036	5,034	1,574	3,034
900	13	1,131	4,917	5,054	2,356	3,054	900	32	1,483	2,068	5,816	1,98	4,816
900	13	1,021	5,424	4,013	2,39	4,013	900	24	1,314	2,074	4,911	1,768	2,911
900	13	1,498	6,179	9,09	6,72	7,09	900	20	1,217	2,001	5,88	1,905	2,88
900	13	1,361	6,058	8,542	3,545	5,542	900	22	1,289	2,917	5,083	1,4	3,083
900	13	1,13	6,137	5,987	2,01	3,987	900	9	0,997	3,167	2,875	1,748	2,875
900	13	0,996	6,282	4,405	2,496	4,405	900	29	1,489	2,806	6,225	2,13	4,225
900	22	1	0	3,121	1,652	3,121	900	14	1,202	2,987	3,687	1,718	3,687
900	22	1,1	0	3,259	1,969	3,259	900	26	1,406	2,953	5,874	1,738	2,874
900	22	1,2	0	4,144	2,189	4,144	900	11	1,102	3,051	4,483	1,942	2,483
900	22	1,3	0	5,071	2,461	4,571	900	13	1,183	4,028	5,043	2,244	3,043
900	22	1,4	0	7,718	3,256	4,718	900	9	1,027	4,139	3,278	1,819	3,278
900	22	1,008	0,974	3,24	1,65	3,24	900	11	1,101	4,002	4,572	2,077	4,572
900	22	1,097	0,936	2,604	1,979	2,604	900	20	1,312	4,034	4,513	1,668	4,513
900	22	1,198	0,971	3,631	1,894	3,631	900	23	1,396	3,981	6,343	2,038	3,343

900	22	1,314	1,002	6,334	3,694	4,334	900	27	1,491	3,999	5,569	1,979	3,569
900	22	1,409	0,989	7,474	4,865	5,474	900	19	1,319	5,077	4,117	2,337	4,117
900	22	1,065	1,887	2,751	2,046	2,751	900	22	1,395	5,215	5,717	1,897	5,717
900	22	1,110	2,300	3,721	2,479	3,721	900	11	1,107	5,138	4,056	2,099	4,056
900	22	1,204	1,778	3,844	2,133	3,844	900	12	1,221	5,121	4,436	2,698	4,436
900	22	1,311	2,059	6,195	2,053	4,195	900	25	1,527	5,041	7,131	3,05	4,131
900	22	1,411	2,235	6,486	3,128	4,486	900	29	1,624	5,056	8,596	4,138	5,627
900	22	1,029	2,925	2,885	1,98	2,885	900	19	1,312	5,997	5,44	1,828	3,44
900	22	1,103	3,025	3,54	2,127	3,54	900	19	1,409	6,113	5,782	2,106	3,782
900	22	1,199	2,982	4,404	2,06	4,404	900	24	1,496	6,009	5,403	2,5	3,403
900	22	1,3	3,002	3,834	1,982	3,834	900	27	1,587	5,856	5,013	2,118	3,013
900	22	1,403	3,028	6,697	4,352	5,697	900	32	1,735	5,959	6,983	4,52	5,941
900	22	1,115	3,682	2,522	2,668	2,522	900	9	1,029	4,914	3,138	1,628	3,138
900	22	1,22	3,814	3,977	1,553	3,977	900	9	0,995	6,063	3,852	1,877	3,852
900	22	1,373	4,141	3,904	1,805	3,904	900	11	1,098	5,937	3,297	1,816	3,297
900	22	1,573	4,174	9,918	3,402	5,918	900	12	1,197	5,919	4,924	1,703	4,924
900	22	1,012	4,639	3,678	2,823	3,678	900	22	1,315	3,034	4,904	1,909	4,904
900	22	1,145	4,858	3,018	2,714	3,018	900	6	0,997	0	5,054	1,553	3,158
900	22	1,274	5,254	3,405	1,982	3,405	900	9	0,997	0	4,013	1,805	2,86
900	22	1,431	5,186	5,096	2,363	3,096	900	16	0,997	0	9,09	3,402	3,056
900	22	0,986	5,765	3,313	2,156	3,313	900	19	0,997	0	8,542	2,823	3,947
900	22	1,096	6,004	2,828	2,323	2,828	900	16	1,315	0	5,987	2,714	2,142
900	22	1,139	5,757	3,627	1,868	3,627	900	19	1,315	0	4,405	1,982	3,811
900	22	1,217	5,791	4,365	2,291	4,365	900	26	1,315	0	3,121	2,363	3,034
900	22	1,411	6,060	6,227	2,35	4,227	900	30	1,315	0	3,259	2,156	4,816
900	22	1,677	6,205	4,577	1,973	2,577	900	16	1,401	0	4,144	2,323	2,911
900	22	1,289	6,177	3,427	2,192	3,427	900	19	1,401	0	5,071	1,868	2,88
900	26	1,401	0	3,432	2,121	3,034	900	26	1,174	0	3,352	1,652	2,635
900	30	1,401	0	3,791	2,306	4,816	900	9	1,089	3,744	3,947	1,969	3,791
900	16	1,310	4,609	2,847	6,604	2,911	900	16	1,089	3,744	2,142	2,189	2,847
900	19	1,310	4,609	3,879	1,893	2,88	900	19	1,089	3,744	3,811	2,461	3,879
900	26	1,310	4,609	4,973	1,453	3,083	900	26	1,089	3,744	3,034	3,256	4,973
900	30	1,310	4,609	2,975	2,156	2,875	900	9	1,133	2,529	4,816	1,65	2,975
900	16	1,369	4,843	5,548	2,65	4,225	900	16	1,133	2,529	2,911	1,979	5,548
900	19	1,369	4,843	4,253	4,79	3,687	900	19	1,133	2,529	2,88	1,894	4,253
900	26	1,369	4,843	3,339	2,431	2,874	900	26	1,133	2,529	3,083	3,694	3,339

900	30	1,369	4,843	2,363	2,092	2,483	900	9	1,155	1,401	2,875	4,865	2,363
900	16	1,395	4,943	3,086	2,273	3,043	900	16	1,155	1,401	4,225	2,046	3,086
900	19	1,395	4,943	5,723	1,725	3,278	900	19	1,155	1,401	3,687	2,479	5,723
900	26	1,395	4,943	4,413	2,004	4,572	900	26	1,155	1,401	2,874	2,133	4,413
900	30	1,395	4,943	2,804	1,942	4,513	900	9	1,061	4,967	2,483	2,053	2,804
900	16	1,295	3,205	3,762	4,16	3,343	900	16	1,061	4,967	3,043	3,128	3,762
900	19	1,295	3,205	2,246	2,422	3,569	900	19	1,061	4,967	3,278	1,98	2,246
900	26	1,295	3,205	2,911	1,462	4,117	900	26	1,061	4,967	4,572	2,127	2,911
900	16	1,424	3,437	4,386	2,69	5,717	900	9	0,911	4,195	4,513	2,06	4,386
900	19	1,424	3,437	3,551	2,053	4,056	900	16	0,911	4,195	3,343	1,982	3,551
900	26	1,424	3,437	3,409	1,498	4,436	900	19	0,911	4,195	3,569	4,352	3,409
900	30	1,424	3,437	4,985	4,703	4,131	900	9	1,001	2,728	4,117	2,668	4,985
900	16	1,416	2,024	3,782	2,05	5,627	900	16	1,001	2,728	5,717	1,553	3,782
900	19	1,416	2,024	3,687	3,473	3,44	900	19	1,001	2,728	4,056	1,805	3,687
900	26	1,416	2,024	4,938	2,931	3,782	900	9	1,034	1,575	4,436	3,402	4,938
900	30	1,416	2,024	3,711	2,466	3,403	900	16	1,034	1,575	4,131	2,823	3,711
900	16	1,357	1,937	4,767	1,7	3,013	900	19	1,034	1,575	5,627	2,714	4,767
900	19	1,357	1,937	5,761	5,833	5,941	900	9	0,982	3,108	3,44	1,982	5,761
900	26	1,357	1,937	2,563	2,415	3,138	900	16	0,982	3,108	3,782	2,363	2,563
900	30	1,357	1,937	4,827	1,947	3,852	900	19	0,982	3,108	3,403	2,156	4,827
900	16	1,418	1,132	3,075	1,834	3,297	900	9	0,914	6,283	3,013	2,323	3,075
900	19	1,418	1,132	4,118	1,801	4,924	900	16	0,914	6,283	5,941	1,868	4,118
900	26	1,418	1,132	3,588	2,285	4,904	900	19	0,914	6,283	3,138	2,291	3,588
900	30	1,418	1,132	6,802	3,646	3,977	900	9	1,130	6,334	3,852	2,35	6,802
900	16	1,282	6,034	3,274	2,627	3,904	900	16	1,130	6,334	3,297	1,973	3,274
900	19	1,282	6,034	2,264	1,377	5,918	900	19	1,130	6,334	4,924	2,466	2,264
900	26	1,282	6,034	3,609	2,005	3,678	900	26	1,130	6,334	4,904	1,7	3,609
900	30	1,282	6,034	3,751	2,291	3,018	900	9	1,210	3,999	3,158	5,833	3,751
900	16	1,395	6,053	6,643	2,222	3,405	900	16	1,210	3,999	2,86	2,415	6,643
900	19	1,395	6,053	5,151	2,69	3,096	900	19	1,210	3,999	3,056	1,947	5,151
900	26	1,395	6,053	7,909	2,425	3,313	900	26	1,210	3,999	3,947	1,834	3,721
900	30	1,395	6,053	3,023	2,2	2,828	900	9	1,264	1,951	2,142	1,801	3,844
900	16	1,487	5,889	4,144	2,543	4,056	900	16	1,264	1,951	3,811	2,285	4,195
900	19	1,487	5,889	4,571	3,055	4,436	900	19	1,264	1,951	3,034	3,646	4,486
900	26	1,487	5,889	4,718	2,462	4,131	900	26	1,264	1,951	4,816	2,627	2,885
900	30	1,487	5,889	3,24	4,538	5,627	900	9	1,026	0	2,911	1,377	3,54

Таблица 2.2
Погрешность датчика давления при $n=900 \text{ мин}^{-1}$

УО З	α	H_2 , %	$\delta t_{t1}, \%$	$\delta t_{pZ}, \%$	УО З	α	H_2 , %	$\delta t_{t1}, \%$	$\delta t_{pZ}, \%$	УО З	α	H_2 , %	$\delta t_{t1}, \%$	$\delta t_{pZ}, \%$
13	1,047	0	5,056	3,056	13	1,020	1,562	2,847	1,905	16	1,174	0	4,51	2,121
13	1,001	0	5,947	3,947	13	0,931	1,419	3,879	1,4	19	1,174	0	8,167	2,306
13	1,079	0	3,142	2,142	9	1,089	3,744	4,973	1,748	16	1,310	4,609	14,4	8,604
13	1,145	0	3,811	3,811	16	1,089	3,744	2,975	2,13	19	1,310	4,609	7,75	1,893
13	1,217	0	5,034	3,034	19	1,089	3,744	5,548	1,718	26	1,310	4,609	4,706	1,453
13	1,344	0	5,816	4,816	26	1,089	3,744	4,253	1,738	30	1,310	4,609	6,172	2,156
13	1,275	0	4,911	2,911	9	1,133	2,529	3,339	1,942	16	1,369	4,843	6,653	2,65
13	1,434	0	5,88	2,88	16	1,133	2,529	2,363	2,244	19	1,369	4,843	5,202	3,79
13	0,925	0	5,083	3,083	19	1,133	2,529	3,086	1,819	26	1,369	4,843	7,482	2,431
13	0,953	0	2,875	2,875	26	1,133	2,529	5,723	2,077	30	1,369	4,843	6,135	2,092
13	1,004	0	6,225	4,225	9	1,155	1,401	4,413	1,668	16	1,395	4,943	4,035	2,273
13	0,986	0	3,687	3,687	16	1,155	1,401	2,804	2,038	19	1,395	4,943	3,43	1,725
13	0,921	0	5,874	2,874	19	1,155	1,401	3,762	1,979	26	1,395	4,943	5,521	2,004
13	1,108	0	4,483	2,483	26	1,155	1,401	2,246	2,337	30	1,395	4,943	4,308	1,942
13	1,156	0	5,043	3,043	9	1,061	4,967	2,911	1,897	16	1,295	3,205	11,8	6,16
13	1,258	0	3,278	3,278	16	1,061	4,967	4,386	2,099	19	1,295	3,205	4,355	2,422
13	0,896	3,887	4,572	4,572	19	1,061	4,967	3,551	2,698	26	1,295	3,205	4,874	1,462
13	0,986	4,316	4,513	4,513	26	1,061	4,967	3,409	3,05	16	1,424	3,437	5,77	2,69
13	1,079	4,772	6,343	3,343	9	0,911	4,195	4,985	4,138	19	1,424	3,437	6,422	2,053
13	1,191	5,325	5,569	3,569	16	0,911	4,195	3,782	1,828	26	1,424	3,437	4,483	1,498
13	1,311	5,934	4,117	4,117	19	0,911	4,195	3,687	2,106	30	1,424	3,437	7,175	4,703
13	1,306	4,709	5,717	5,717	9	1,001	2,728	4,938	2,5	16	1,416	2,024	5,1	2,05
13	1,217	4,356	4,056	4,056	16	1,001	2,728	3,711	2,118	19	1,416	2,024	7,515	3,473
13	1,072	3,787	4,436	4,436	19	1,001	2,728	4,767	4,52	26	1,416	2,024	5,54	2,931
13	0,988	3,469	7,131	4,131	9	1,034	1,575	5,761	1,628	30	1,416	2,024	9,88	2,466
13	0,918	3,207	8,596	5,627	16	1,034	1,575	2,563	1,877	16	1,357	1,937	4,6	1,7
13	0,966	2,635	5,44	3,44	19	1,034	1,575	4,827	1,816	19	1,357	1,937	6,66	5,833
13	0,938	2,554	5,782	3,782	9	0,982	3,108	3,075	1,703	26	1,357	1,937	5,4	2,415
13	1,016	2,780	5,403	3,403	16	0,982	3,108	4,118	1,909	30	1,357	1,937	4,713	1,947
13	1,091	2,997	5,013	3,013	19	0,982	3,108	3,588	1,553	16	1,418	1,132	4,408	1,834
13	1,197	3,314	6,983	5,941	9	0,914	6,283	6,802	1,805	19	1,418	1,132	4,116	1,801
13	1,256	3,837	3,138	3,138	16	0,914	6,283	3,274	3,402	26	1,418	1,132	4,422	2,285

13	1,408	4,350	3,852	3,852	19	0,914	6,283	2,264	2,823	30	1,418	1,132	6,307	3,646
13	0,953	5,131	3,297	3,297	9	1,130	6,334	3,609	2,714	16	1,282	6,034	5,025	2,627
13	1,018	5,529	4,924	4,924	16	1,130	6,334	3,751	1,982	19	1,282	6,034	4,46	1,377
13	1,180	6,543	4,904	4,904	19	1,130	6,334	6,643	2,363	26	1,282	6,034	3,65	2,005
13	1,135	6,261	5,054	3,158	26	1,130	6,334	5,151	1,969	30	1,282	6,034	4,478	2,291
13	1,012	2,055	4,013	2,86	9	1,210	3,999	4,909	2,189	16	1,395	6,053	6,35	2,222
13	0,914	1,849	9,09	3,056	16	1,210	3,999	4,827	2,461	19	1,395	6,053	4,328	2,69
13	1,162	2,378	8,542	3,947	19	1,210	3,999	3,075	3,256	26	1,395	6,053	5,93	2,425
13	1,276	2,626	5,987	2,142	26	1,210	3,999	4,118	1,65	30	1,395	6,053	4,162	2,2
13	1,007	0,791	4,405	3,811	9	1,264	1,951	3,588	1,979	16	1,487	5,889	5,324	4,568
13	0,931	0,731	3,121	3,034	16	1,264	1,951	3,802	1,894	19	1,487	5,889	4,478	2,291
13	1,051	0,827	3,259	1,801	19	1,264	1,951	3,274	3,694	26	1,487	5,889	6,35	2,222
13	1,158	0,913	4,144	2,285	26	1,264	1,951	2,264	4,865	30	1,487	5,889	4,328	2,69
13	1,304	1,427	5,071	3,646	9	1,026	0	3,609	2,046	9	0,848	0	5,93	2,425
13	1,283	1,982	4,144	2,543	16	1,026	0	3,751	2,479	16	0,848	0	4,162	2,2
13	1,149	1,767	4,571	3,055	19	1,026	0	3,643	2,133	19	0,848	0	3,896	2,035

ГЛАВА 3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

3.1. Связь ионного тока со скоростью распространения и шириной ЗХР пламени при изменении коэффициента избытка воздуха, концентрации водорода в топливе и частоты вращения коленчатого вала двигателя

При использовании ионизационного датчика получены значения амплитуды ионного тока. Особенности связи амплитуды ионного тока с составом ТВС описаны в работах [21, 27-29]. Для проверки полученных значений были построены графические зависимости пика ионного тока от коэффициента избытка воздуха при разных концентрациях водорода и скоростных режимах ДВС, рисунки 3.1.1 и 3.1.2.

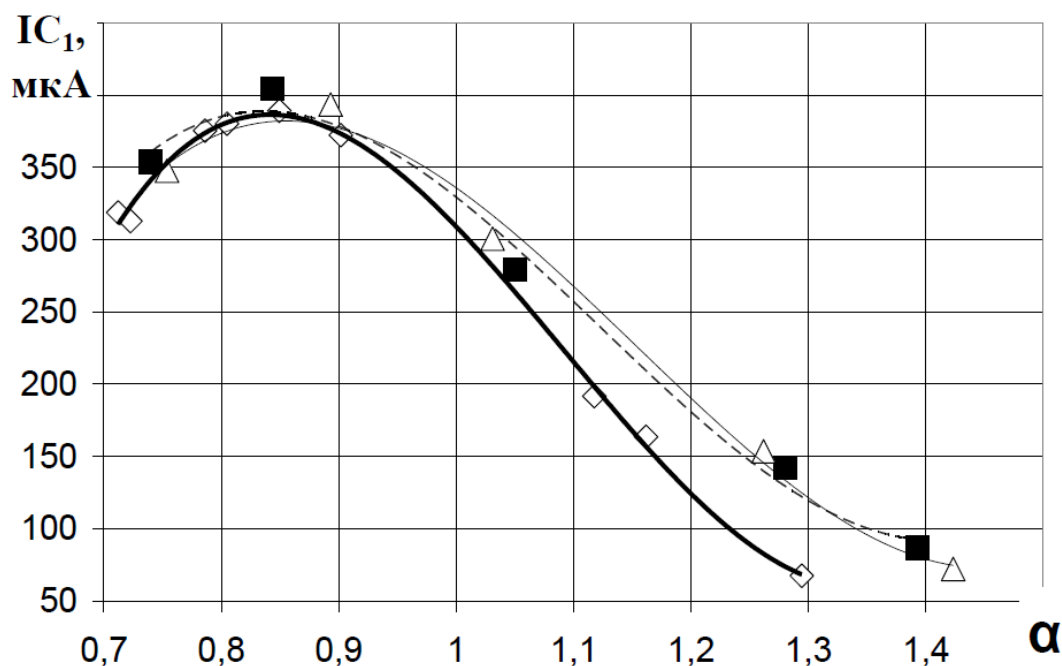


Рисунок 3.1.1 – Связь электропроводности углеводородного пламени на ИД-1 от коэффициента избытка воздуха и концентрации водорода ($n=600 \text{ мин}^{-1}$): \diamond -0%, \blacksquare -3%, \triangle -5%

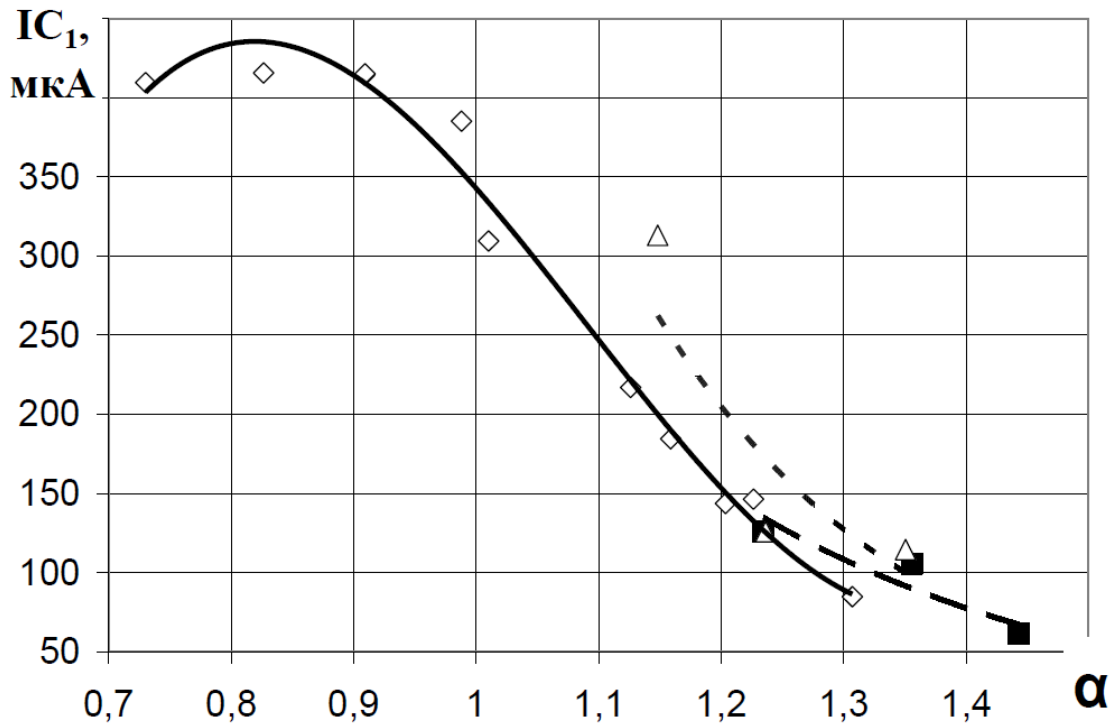


Рисунок 3.1.2 – Связь электропроводности пламени на ИД-1 от коэффициента избытка воздуха и концентрации водорода ($n=900 \text{ мин}^{-1}$): \diamond -0%, \blacksquare -3%, Δ -5%

Анализ рисунка показал, что связь амплитуды ионного тока от состава ТВС имеет примерно схожий характер и не меняется при варьировании скоростного режима ДВС и концентрации водорода в ТВС в исследуемом диапазоне. Пиковые значения амплитуды ионного тока находятся в зоне богатой ТВС, т.е. $\alpha < 0,9$. С возрастанием скоростного режима ДВС с $n=600 \text{ мин}^{-1}$ до $n=900 \text{ мин}^{-1}$ электропроводность пламени возрастает. Так, при работе УИТ-85 на бензине, увеличение скоростного режима моторной установки на 30% способствует к увеличению амплитуды ионного тока на 10% при стехиометрическом составе ТВС, т.е. $\alpha=1$.

Также было выявлено, что для изучаемой области наблюдается значительное возрастание электропроводности пламени только при 3% добавке водорода в ТВС. Последующее увеличение доли водорода в топливе не приводит к росту электропроводности пламени. Особенно заметно данная зави-

симось проявляется при работе моторной установки с $\alpha > 1,1$. Так, при $\alpha = 1,1$ добавление 3% водорода приводит к увеличению ионного тока на 18% ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$) и на 25% ($n = 900 \text{ мин}^{-1}$), а при $\alpha = 1,33$, увеличение электропроводности пламени уже равна 52% ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$) и 35% ($n = 900 \text{ мин}^{-1}$).

Таким образом, анализ графических зависимостей показал, что характер изменения тока на ионизационном датчике, находящемся вдали от источника воспламенения, зависит от изменения физико-химических свойств топлива. Это говорит о целесообразности применения метода ионизационных зондов, т.е. на основе явления электропроводности углеводородного пламени, в качестве инструмента для изучения процесса горения в поршневых ДВС. Зависимость местной турбулентной скорости распространения фронта углеводородного пламени от коэффициента избытка воздуха, концентрации газообразного водорода в ТВС и скоростного режима поршневой моторной установки УИТ-85, показана на рисунке 3.1.3.

На рисунке отчетливо видно, что максимальное значение турбулентной скорости распространения пламени фиксируется при коэффициенте избытка воздуха равном $\alpha = 0,85$, при котором достигается пиковая мощность ДВС. Отмечено, что скорость распространения пламени возрастает, с ростом скоростного режима ДВС. Так, при увеличении пульсационной скорости пламени, за счет изменения скоростного режима моторной установки на 30%, наблюдалось 25% увеличение турбулентной скорости распространения пламени при стехиометрическом составе ТВС. В свою очередь, при сжигании бедной ТВС рост турбулентной скорости распространения пламени составил только 10%.

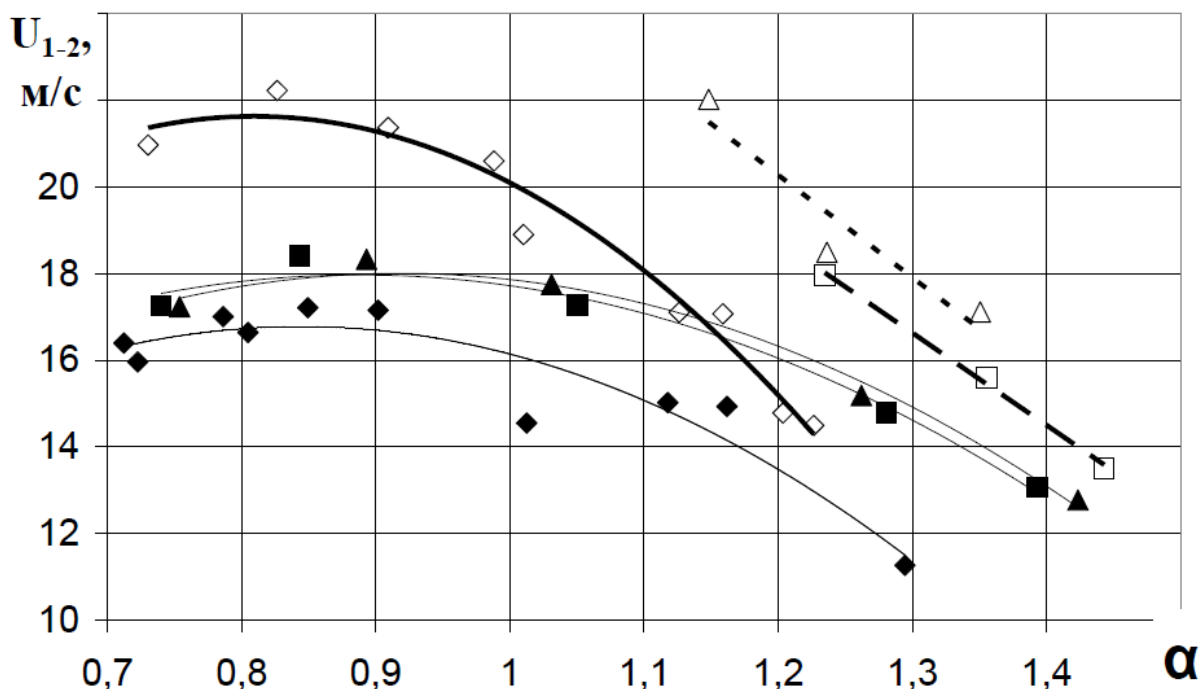


Рисунок 3.1.3 – Изменение местной турбулентной скорости распространения углеводородного пламени у ИД при варьировании коэффициента избытка воздуха и концентрации водорода в ТВС: $n=900 \text{ мин}^{-1}$: \diamond -0%, \square -3%, Δ -5%; $n=600 \text{ мин}^{-1}$: \blacklozenge -0%, \blacksquare -3%, \blacktriangle -5%

На рисунке 3.1.3 видно, что с увеличением коэффициента избытка воздуха прирост турбулентной скорости распространения пламени за счёт роста степени турбулентности (т.е. скоростного режима ДВС) снижается.

При увеличении концентрации газообразного водорода в топливе скорость распространения пламени сильно возрастает во всём диапазоне коэффициента избытка воздуха. Также выявлено, что чем больше коэффициент избытка воздуха и больше концентрация водорода в топливе, тем сильнее увеличение скорости распространения пламени. Так, например, при коэффициенте избытка воздуха равном $\alpha=1,3$ добавка водорода в количестве 3% увеличивает турбулентную скорость распространения пламени на 20% ($n = 900 \text{ мин}^{-1}$) и на 15% ($n=600 \text{ мин}^{-1}$), а при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ рост скорости пламени составляет только 10% ($n=900 \text{ мин}^{-1}$) и 8% ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$). Данная картина наблюдается потому, что добавление в топливо водо-

рода приводит к увеличению концентрации активных центров химически реакций, в результате, скорость распространения пламени увеличивается [21, 22].

На рисунке 3.1.4 представлена зависимость электропроводности углеводородного пламени на ИД-1 от местной скорости распространения пламени. На рисунке видно, что при изменении доли водорода в ТВС и скоростного режима ДВС сохраняется линейная зависимость электропроводности углеводородного пламени от местной турбулентной скорости распространения пламени.

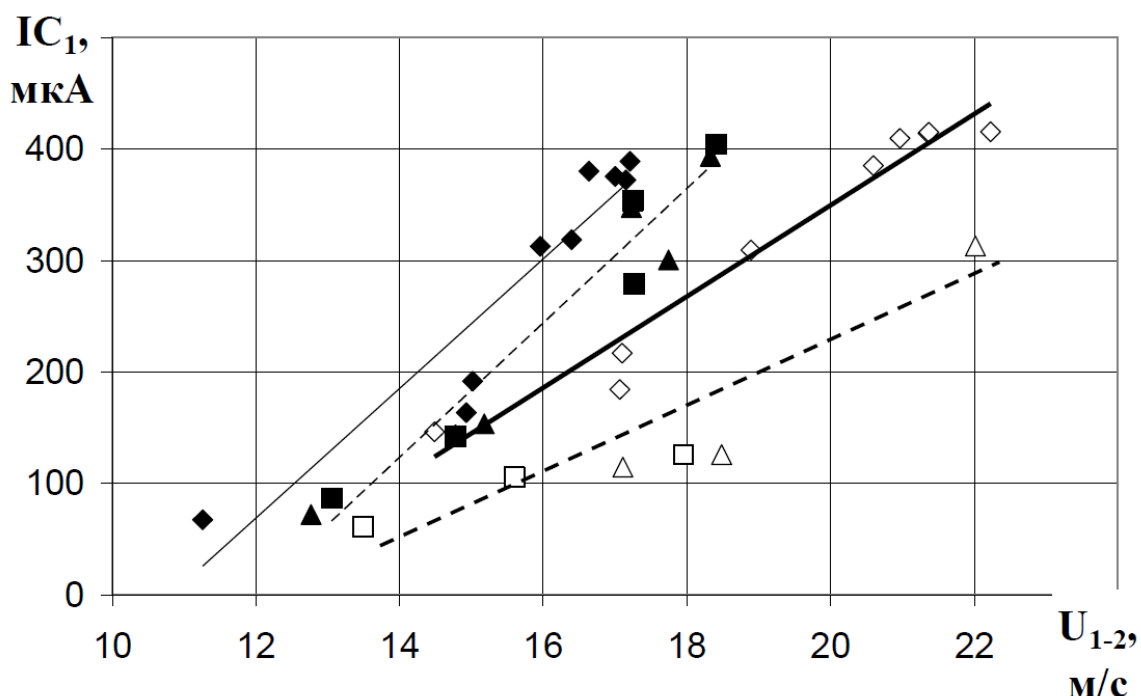


Рисунок 3.1.4 – Зависимость электропроводности углеводородного пламени у ИД-1 от местной скорости распространения пламени: $n=600 \text{ мин}^{-1}$,
 \blacklozenge -0%, \blacksquare -3%, \blacktriangle -5%; $n=900 \text{ мин}^{-1}$, \diamond -0%, \square -3%, \triangle -5%

С добавлением газообразного водорода в горючее электропроводность углеводородного пламени уменьшается и становится постоянной при концентрациях водорода в топливе $>3\%$. При $U=16 \text{ м/с}$ при добавлении в ТВС водорода в количестве 3%, электропроводность углеводородного пламени уменьшается на 45%. В свою очередь отмечено, что при скорости $U=16 \text{ м/с}$

добавление водорода в количестве 3% способствует уменьшению электропроводности пламени на 18%.

Таким образом, анализ экспериментов показал наличие линейной связи между электропроводностью углеводородного пламени с местной скоростью распространения пламени в условиях поршневого ДВС с искровым зажиганием. Данный факт позволяет изучать интенсивность химических реакций в камерах сгорания поршневых энергоустановок при отсутствии возможности применять иные экспериментальные методы исследования пламени.

Ширина зоны химических реакций рассчитывалась по методике, описанной в работе [29]. Зависимость ширины ЗХР от коэффициента избытка воздуха при разной концентрации газообразного водорода и скоростного режима ДВС представлена на рисунке 3.1.5.

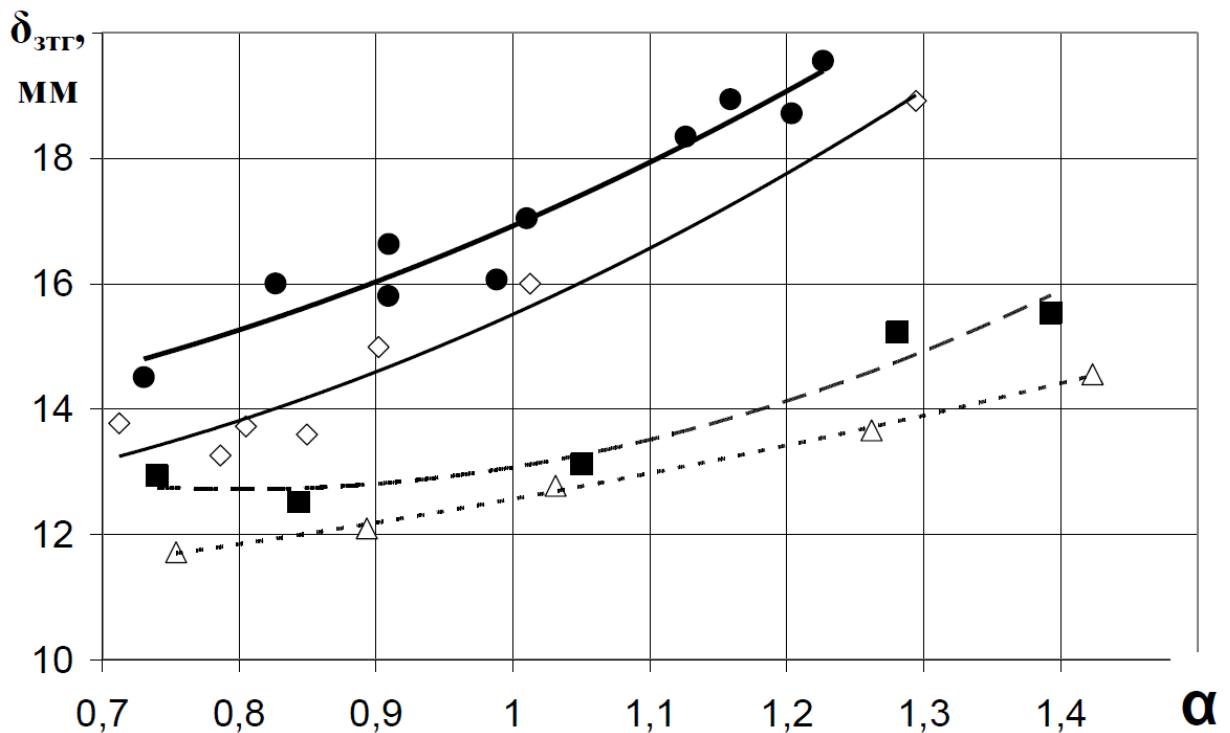


Рисунок 3.1.5 – Зависимость ширины зоны химических реакций от коэффициента избытка воздуха: $n=600 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : ◇-0%; ■-3%; △-5%; $n=900 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : ●-0

С увеличением скоростного режима ДВС ширина ЗХР растет. Это объясняется ростом площади горения ТВС за счёт увеличения интенсивности турбулентности. Эта тенденция имеет место также и в работах других исследователей [29]. С ростом частоты скоростного режима ДВС время, необходимое на процесс сгорания углеводородного топлива убывает, что, в результате, приводит к увеличению протяженности ЗХР.

С увеличением концентрации газообразного водорода в топливе наблюдается уменьшение протяженности ЗХР во всём диапазоне коэффициента избытка воздуха. Отмечено также наличие сходимости результатов собственных исследований протяженности ЗХР пламени с работами Н.В. Иноземцева, который использовал иной экспериментальный аппарат [29].

На рисунке 3.1.6 представлена протяженности ЗХР при изменении угла опережения зажигания и состава ТВС.

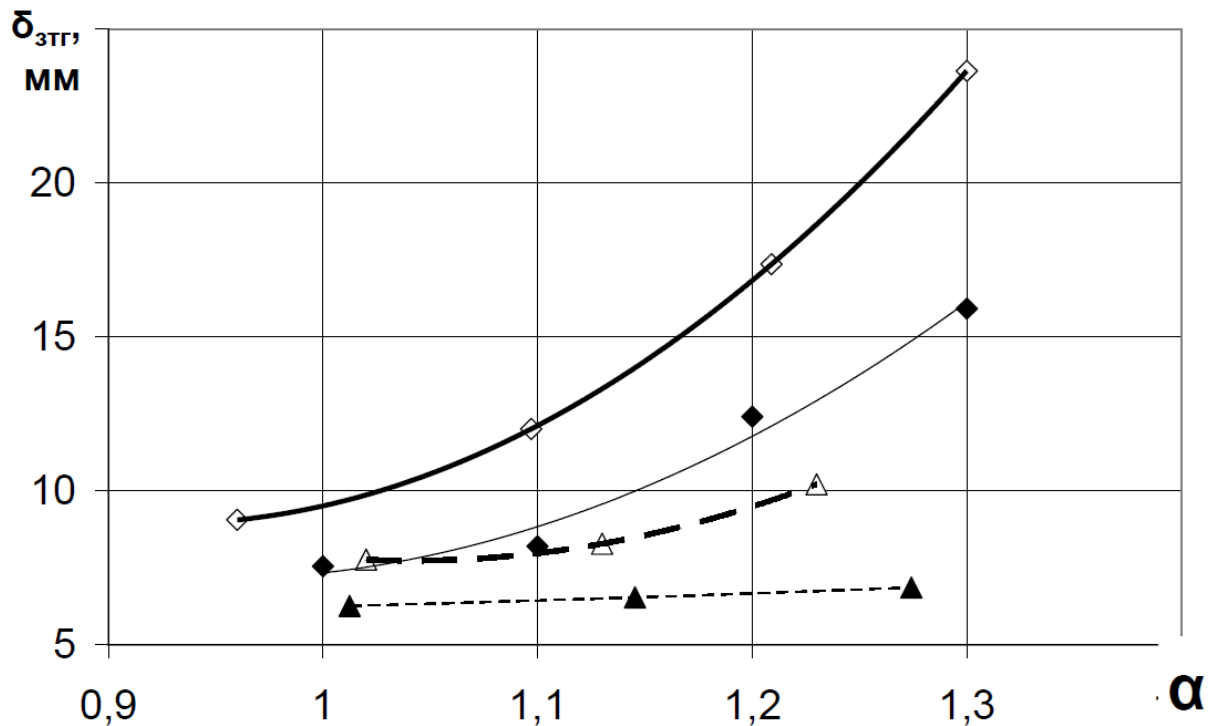


Рисунок 3.1.6 – Зависимость ширины зоны турбулентного горения от коэффициента избытка воздуха ($n=900 \text{ мин}^{-1}$): $\theta_{о.з.}=13 \text{ гр.}$, g_{H_2} : \diamond -0%; Δ -5%;
 $\theta_{о.з.}=22 \text{ гр.}$, g_{H_2} : \blacklozenge -0%; \blacktriangle -5%

С увеличением угла опережения зажигания протяженность ЗХР уменьшается, причём при угле опережения зажигания 22 градуса и росте концентрации газообразного водорода на 5% протяженность ЗХР остается практически постоянной во всем диапазоне коэффициента избытка воздуха. Таким образом, угол опережения зажигания значительно влияет на протяженность ЗХР.

Для прикладного использования явления электропроводности углеводородного пламени при получении информации о протяженности ЗХР и анализа воздействия интенсивности химических реакций в ЗХР пламени на протяженность ЗХР на графике 3.1.7 представлена связь протяженности ЗХР с электропроводностью углеводородного пламени при разной частоте вращения коленчатого вала и концентрации газообразного водорода в ТВС.

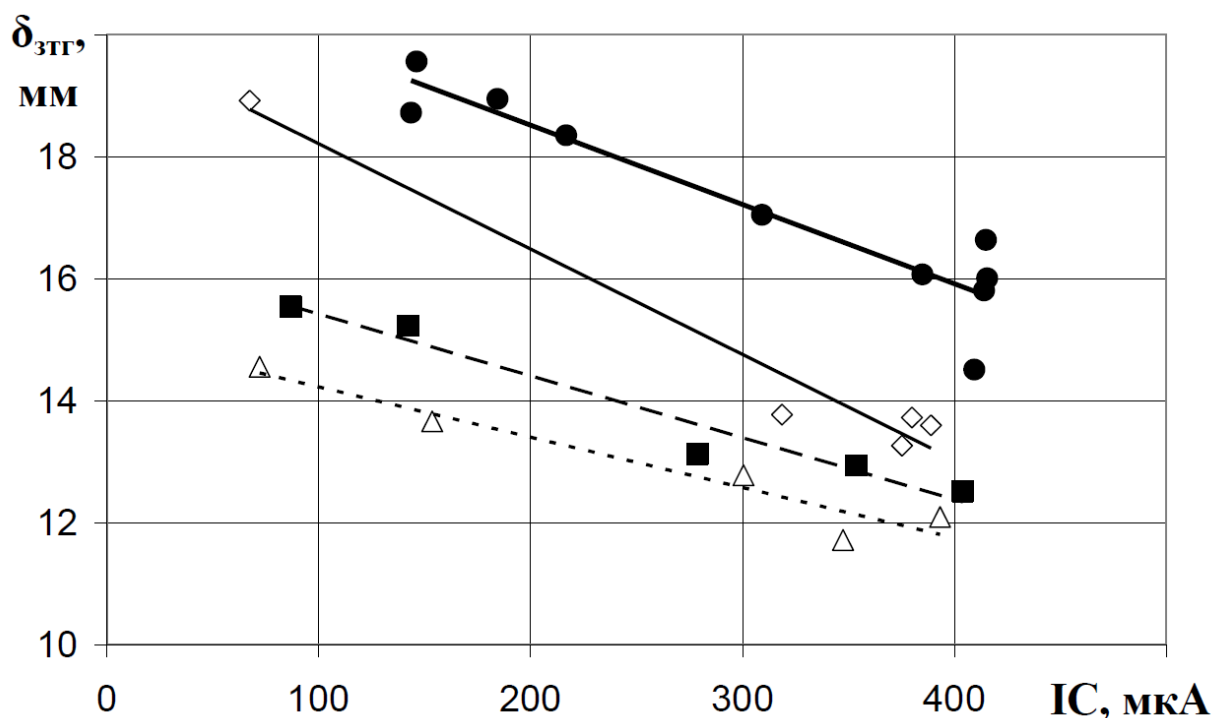


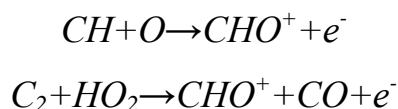
Рисунок 3.1.7 – Зависимость протяженности ЗХР от электропроводности углеводородного пламени: $n=600 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \diamond -0%, \blacksquare -3%, \triangle -5%;
 $n=900 \text{ мин}^{-1}$, g_{H_2} : \bullet -0

Анализ рисунка показал, что протяженность ЗХР увеличивается при снижении электропроводности углеводородного пламени. Также выявлена линейная зависимость исследуемых величин. Приведенный графический анализ может применяться для оценки протяженности ЗХР по электропроводности углеводородного пламени. Поскольку электропроводность углеводородного пламени косвенно определяет интенсивность химических процессов в ЗХР пламени, поэтому со снижением интенсивности химических реакций протяженность ЗХР увеличивается по линейному закону.

3.2. Влияние пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени

Влияние пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени подробно представлено в опубликованной нами работе [23]. В которой приводятся следующие данные: «В настоящее время среди широкого спектра методов исследования процесса сгорания топлива в поршневых энергетических установках, ионизационные датчики (ИД) все ещё остаются самыми дешёвыми и надёжными. Поэтому во всем мире ИД достаточно успешно и давно используют для индикации наличия/отсутствия пламени в камерах сгорания двигателей и энергетических установок. Постоянные попытки расширить функциональные возможности ИД (например, определение ими характеристик пламени, турбулентности и токсичности продуктов сгорания топлива) сталкиваются с преградой нерешенных научных вопросов. Одним из которых является определение влияния пульсационной скорости пламени на показания ИД, т.е. на ионный ток» [23].

«Значение ионного тока обусловлено электропроводностью фронта углеводородного пламени, т.е. химионизацией; согласно существующим представлениям химионизация происходит в той части пламени, где наблюдаются максимальные концентрации радикала CH и C_2 » [29]:



В работе российских ученых была: «Выявлена линейная корреляция скорости хемионизации со скоростью химических реакций горения. Пиковые значения обеих скоростей наблюдались при стехиометрическом составе топливовоздушной смеси (ТВС), при этом отмечено смещение в область богатой ТВС пика ионного тока относительно пика скорости хемионизации и данный факт объясняется влиянием доли углерода на процесс ионизации, таким образом, значение ионного тока (I) в углеводородном пламени определяется формулой (1)» [29].

$$I=g_c\cdot U_x\cdot const, \quad (1)$$

где g_c – массовая доля углерода в топливе; U_x – скорость химических реакций горения, кг/(м³·с).

«Концентрация частиц углерода в зоне химических реакций пламени зависит от содержания углерода в горючем и интенсивности его транспортировки молекулярной и турбулентной диффузией из ТВС во фронт пламени (ФП), т.е. от массопереноса» [23].

«На основании современных представлений о турбулентном пламени нами предлагается гипотеза, что пульсационная скорость (U') определяет интенсивность транспортировки частиц топлива, а значит и углерода, в зону химических реакций пламени (ЗХР). Чем выше значение пульсационной скорости, тем больше углеродсодержащих частиц топлива проникает во ФП. При этом возрастают потери тепла на нагрев этих частиц топлива, что способствует снижению температуры во ФП, а значит и скорости химических реакций. Данный механизм схож с процессом снижения турбулентной скорости распространения пламени и его погасанием при чрезмерно высокой турбулентности. Для проверки правильности выдвинутой гипотезы было изучено влияние пульсационной скорости на электропроводность метановоздушного пламени, которая оценивалась величиной ионного тока. Состав топлива,

доля в нём углерода, начальная температура топлива, объем камеры сгорания были постоянны. Пульсационная скорость изменялась от 0 до 26 м/с, т.е. охватывает весь диапазон скоростных режимов работы поршневой энергоустановки. Таким образом, в принятых условиях и в соответствии с формулой (1) влияние пульсационной скорости на ионный ток будет определяться её влиянием на скорость химических реакций, которая зависит от максимальной температуры (T_b) и концентрации топлива в ЗХР пламени ($N_{зхр}$)» [23].

Влияние U' на $N_{зхр}$ изучено с применением дифференциального уравнения диффузии, которое было приведено к условиям турбулентного горения добавлением в него коэффициента турбулентной диффузии (D_t), формула (2):

$$\rho U_n \frac{dN}{dx} = \rho(D + D_t) \frac{d^2 N}{dx^2} - U_x, \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³; U_n – нормальная скорость пламени, м/с; N – относительная весовая концентрация топлива; D – коэффициент молекулярной диффузии ($D=5 \cdot 10^{-4}$), м²/с; x – расстояние, м.

Результатом решения уравнения (2) стало нахождение $N_{зхр}$, формула (3):

$$N_{зхр} = \exp\left[-\frac{\chi}{D + D_t}\right], \quad (3)$$

$$D_t = U' l, \quad (4)$$

где χ – температуропроводность ($\chi=5 \cdot 10^{-4}$), м²/с; l – путь смешения ($l=10^{-3}$), м.

«Значение пути смешения соответствует толщине ФП, т.к. известно [10], что только при масштабе турбулентности равном (либо меньшем) толщине ФП турбулентные вихри могут проникнуть во ФП и повлиять на интенсивность переноса топлива из зоны подогрева в ЗХР. Таким образом, из формулы (3) следует, что зависимость $N_{зхр}$ от U' имеет экспоненциальный характер, рис. 1» [23].

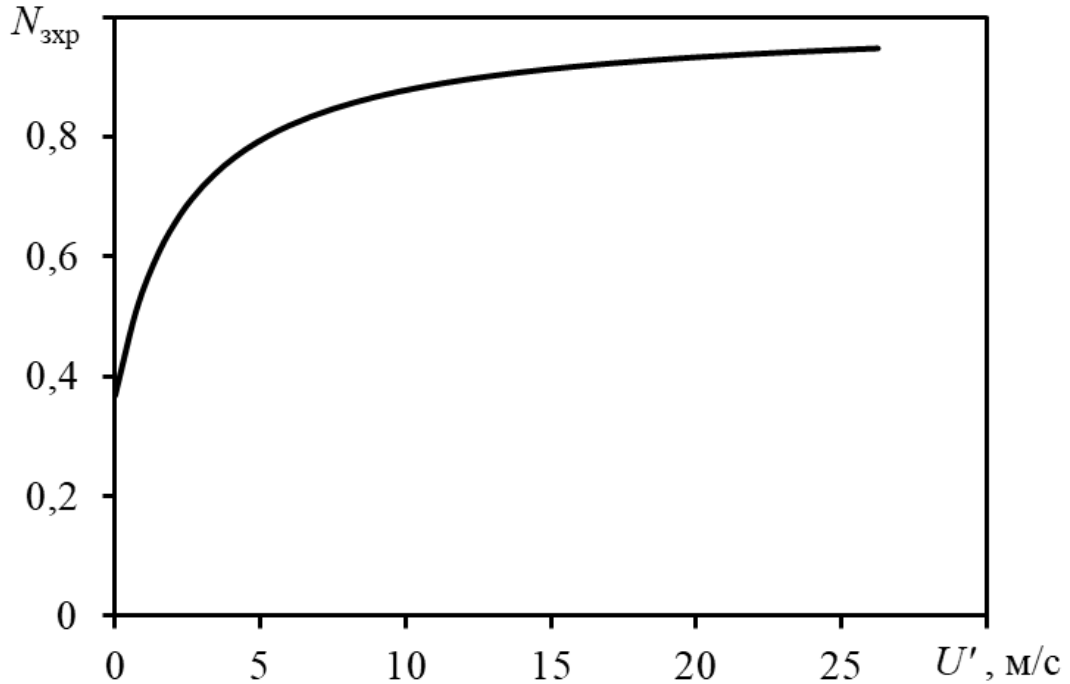


Рисунок 3.2.1 - Влияние пульсационной скорости (U') на концентрацию топлива ($N_{зxp}$) в ЗХР

«На рисунке 3.2.1 видно, что при $U' < 5$ происходит значительный рост $N_{зxp}$. По мере увеличения U' интенсивность роста $N_{зxp}$ снижается, и её значение стремится к единице. Таким образом, по известным значениям максимальной температуры пламени и концентрации топлива в ЗХР были рассчитаны скорость химических реакций и ионный ток. На рис. 3 показано влияние U' на ионный ток, значения которого представлены в относительных величинах, формула (6)» [23]:

$$I_{отн} = \frac{I_{(U'=x)}}{I_{(U'=0)}}, \quad (6)$$

где $I_{отн}$ – относительное значение ионного тока; $I_{(U'=x)}$ – значение ионного тока при рассматриваемой пульсационной скорости, А; $I_{(U'=0)}$ – значение ионного тока при $U'=0$, т.е. ламинарном горении, А.

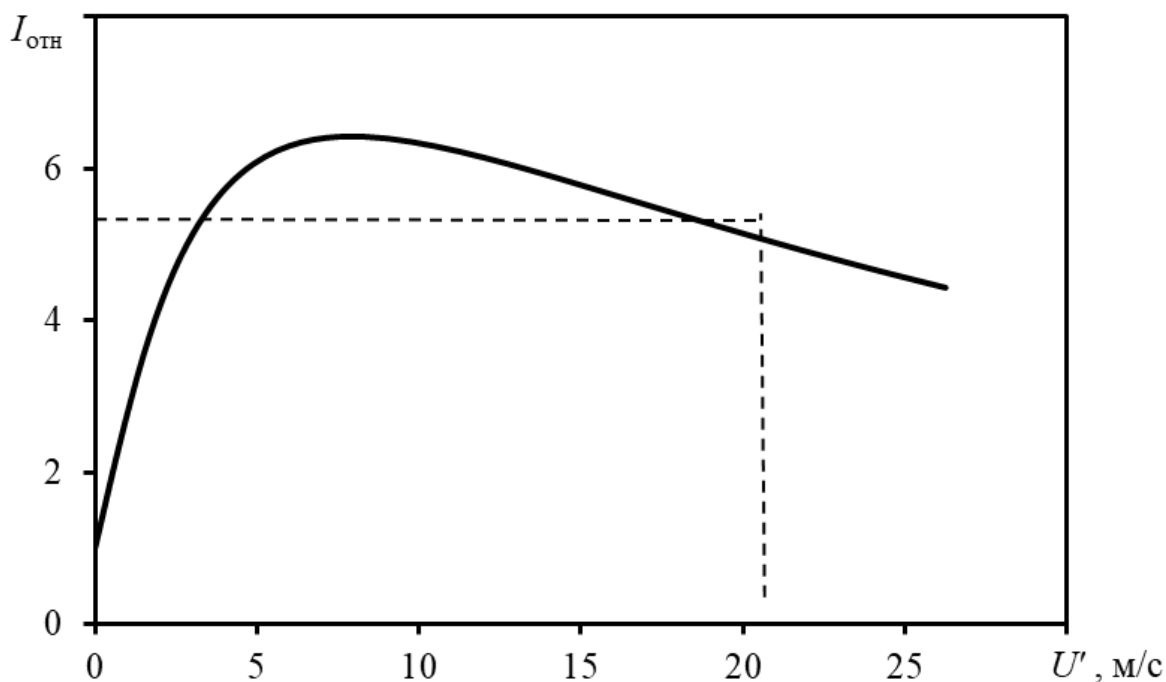


Рисунок 3.2.2 - Влияние пульсационной скорости (U') на ионный ток пламени ($I_{отн}$): ---- предельные значения U' и $I_{отн}$ соответствующие моменту погасания пламени

В опубликованной нами работе: «Анализ рисунка 3.2.2 показал, что электропроводность турбулентного пламени значительно превышает электропроводность ламинарного пламени, таким образом, выявлено двойственное влияние пульсационной скорости на электропроводность пламени, при $U' < 6$ м/с зафиксирован рост ионного тока, что объясняется увеличением температуры пламени и концентрации углеродсодержащих частиц топлива в зоне химических реакций пламени, а при $U' > 6$ м/с происходит снижение ионного тока, что вызвано возрастанием затрат тепла на нагрев поступающего топлива во фронт пламени, которое прямо пропорционально пульсационной скорости» [23].

3.3. Взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов с протяженностью зоны химических реакций

При сгорании углеводородного топлива в зоне реакций многочисленных реакций горения наблюдается явление электропроводности пламени, обусловленное неравновесной концентрацией ионов и электронов. Это явление регистрируется при контакте углеводородного пламени с контактами ионизационного датчика, при котором в электрической цепи датчика появляется ионный ток. Величина ионного тока зависит от химического состава топлива, состава топливно-воздушной смеси (ТВС) и других параметров, при которых протекает процесс сгорания.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания разделяются на двигатели с внутренним и внешним смесеобразованием. К первому типу относятся дизельные и бензиновые с впрыском топлива в цилиндры двигателя, к второму типу относятся двигатели с подачей топлива во впускные каналы. При внутреннем смесеобразовании происходит сгорание неоднородной по фазе и составу топливно-воздушной смеси, когда в камере сгорания существуют распределённые в потоке воздуха зоны, заполненные каплями жидкого или испарённого топлива, смеси паров топлива при коэффициентах избытка воздуха от нуля до бесконечности. При внешнем смесеобразовании происходит сгорание однородной по фазе и составу ТВС. В этом случае в любой зоне камеры сгорания ТВС находится в одинаковом агрегатном состоянии и одинаковым коэффициенте избытка воздуха.

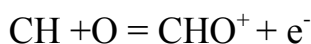
Разные способы смесеобразования могут оказывать различные воздействия на процесс ионизации углеводородного топлива.

Особое значение, кроме этого можно ожидать при использовании комpositного топлива, когда в углеводородовоздушную смесь добавляется газообразный водород.

Исследование ионизации пламени при сгорании неоднородной смеси показало, что наряду наличия сходства с известными результатами испытаний по изучению электропроводности пламени однородной смеси при ламинарном и турбулентном горении, существуют и заметные отличия.

Выявлено, что зона максимальной ионизации располагается до зоны достижения максимальной температуры. Причём этот эффект отмечен и при впрыске топлива в ЗЦ и при подаче топлива на стабилизаторы пламени. При впрыске топлива в ЗЦ зона максимальной ионизации находится внутри ЗЦ, при подаче топлива на стабилизатор пламени – в зоне смешения между ЗЦ и обтекающим её потоком ТВС. В обоих случаях максимальная температура регистрировалась вблизи оси ЗЦ.

Эти результаты подтверждают положение, сформулированное Калькоттом, что ионизации углеводородного пламени происходит за счёт химических реакций горения, основной из которых является реакция радикала СН с атомом кислорода О в виде:



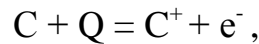
Эти результаты совпадают с данными, полученными при ламинарном и турбулентном горении однородной смеси.

Но в тоже время при уменьшении давления в камере сгорания более, чем в четыре раза ионный ток в этих испытаниях не показал заметных изменений.

При сгорании однородной ТВС уменьшение давления в камере сгорания приводит к снижению величины ионного тока, аналогичному уменьшению нормальной скорости распространения пламени. Эти экспериментальные данные свидетельствуют о том, что механизм ионизации неоднородного пламени более сложен, чем было рассмотрено ранее при участии радикала СН.

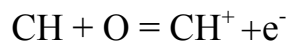
Результаты экспериментов и их анализ показывает, что весомый вклад в ионизацию пламени неоднородной смеси вносит эмиссия электронов с рас-

калённых частиц сажи, образующихся при пиролизе переобогащённой ТВС, по механизму

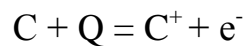


где Q – подведённое тепло для нагрева частицы сажи.

Таким образом, при исследовании процесса горения неоднородной ТВС необходимо учитывать, что ионизация пламени определяется двумя механизмами: реакцией радикала CH с кислородом по схеме



и



Эксперименты в камере сгорания переменного объёма в условиях, характерных для ДВС с впрыском бензина во впускной канал, показали, что механизм ионизации в условиях, когда процесс сгорания протекает при изменении в течении нескольких миллисекунд температуры, давления, объёма, скорости и турбулентных пульсаций, аналогичен механизму при ламинарном и турбулентном горении однородной смеси.

Обобщение результатов исследований представлено в опубликованных статьях [24-29]. В них представлены выведенные полуэмпирические формулы для определения максимальной температуры пламени, а также зависимости для определения концентрации несгоревших углеводородов при сгорании метановоздушной и метановодородовоздушной смеси.

Максимальная температура пламени определяется зависимостью

$$T_b = \frac{H_u N_{зхр}}{C_p \left(1 + \frac{U'}{N_{зхр}} K \right)} + T_0,$$

где H_u – теплота сгорания топлива ($H_u=55,5 \cdot 10^3$), Дж/кг; C_p – теплоёмкость ($C_p=14,8$), Дж/(кг·К); K – постоянная ($K=0,1$), (м/с)⁻¹; T_0 – начальная температура топлива ($T_0=400$), К.

Для определения концентрации несгоревших углеводородов предложен комплекс:

$$\Phi = C_{GH} \cdot \left(\frac{\delta_G}{\delta_{GH}} \right)^{2,5 \cdot \frac{g_H}{g_C}},$$

где индекс G соответствует условиям при сгорании бензовоздушной смеси; индекс GH соответствует условиям при сгорании бензоводородовоздушной смеси; g_C – массовая доля углерода в ТВС, δ – ширина зоны турбулентного горения (ЗТГ).

Параметр Φ позволяет определять эффективность влияния добавки водорода на снижение несгоревших СН по формуле:

$$C_{GH} = C_G \cdot \left(\frac{\delta_{GH}}{\delta_G} \right)^{2,5 \cdot \frac{g_H}{g_C}},$$

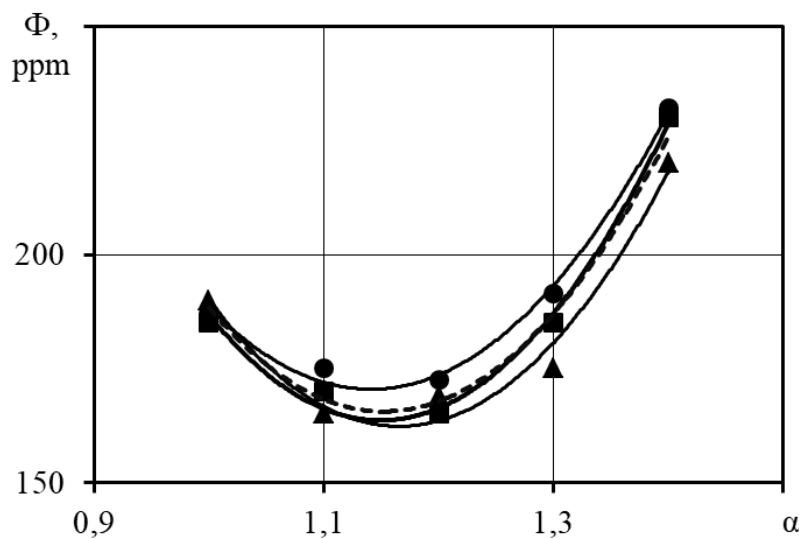


Рисунок 3.3.1 – Параметр Φ от коэффициента избытка воздуха

● – $g_H = 0\%$; ■ – $g_H = 3\%$; ▲ – $g_H = 5\%$

Сходимость рассчитанных по разработанной формуле значений концентраций несгоревших СН с результатами, полученными экспериментальным путём, превышает 90%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что зависимость амплитуды ионного тока от состава ТВС имеет примерно схожий характер и не меняется при варьировании скоростного режима ДВС и концентрации водорода в ТВС в исследуемом диапазоне. Пиковые значения амплитуды ионного тока находятся в зоне богатой ТВС, т.е. $\alpha < 0,9$. С возрастанием скоростного режима ДВС с 600 до 900 мин⁻¹ электропроводность пламени возрастает.

2. При увеличении концентрации газообразного водорода в топливе скорость распространения пламени возрастает, а ширина ЗХР убывает, при этом, чем больше коэффициент избытка воздуха и концентрация водорода в топливе, тем сильнее проявляется данная закономерность.

3. Анализ экспериментов показал наличие линейной связи электропроводности углеводородного пламени с местной скоростью распространения и протяженностью ЗХР пламени в условиях поршневого ДВС с искровым зажиганием. Данный факт позволяет изучать интенсивность химических реакций в камерах сгорания поршневых энергоустановок при отсутствии возможности применять иные экспериментальные методы исследования пламени.

4. Выявлено двойственное влияние пульсационной скорости на электропроводность пламени, при $U' < 6$ м/с наблюдается увеличение электропроводности пламени, а при $U' > 6$ м/с происходит ее снижение.

5. Предложен комплекс Φ , который определять эффективность влияния добавки водорода на снижение несгоревших $СН$. Сходимость рассчитанных по разработанной формуле значений концентраций несгоревших $СН$ с результатами, полученными экспериментальным путём, превышает 90%.

СОКРАЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

БВС – бензовоздушная смесь

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

ИД – ионизационный датчик

ИЗ – ионизационный зонд

КС – камера сгорания

ОГ – отработавшие газы

ПГ – природный газ

ТВС – топливовоздушная смесь

ЦПГ – цилиндропоршневая группа

СН – несгоревшие углеводороды

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Alger T., Hall M., and Matthews R. D., Effects of Swirl and Tumble on In-Cylinder Fuel Distribution in a Central Injected DISI Engine, SAE Paper 2000-01-0533.
2. Alkidas A. C., Combustion Advancements in Gasoline Engines, Energy Con-version and Management 48 (2007) 2751–2761.
3. Anon, Volkswagen AG, Bosch Motronic MED7 Gasoline Direct In-jection, Volkswagen Self-Study Program 253, 2002, Wolfsburg.
4. Anon, Volkswagen AG, Twin Turbo Charger TSI Engine, Volkswagen Self-Study Program 359, 2006, Wolfsburg.
5. Anon, Volkswagen AG, TSI Turbocharged Engine, Volkswagen Self-Study Program 824803, 2008, U.S.A.
7. Baumgarten C., Mixture Formation in Internal Combustion Engines, Springer Verlag, Germany, 2006.
8. Chang W. S., Kim Y. N. and Kong J. K., Design and Development of a Central Direct Injection Stratified Gasoline Engine, SAE Paper 2007-01-3531.
9. Spegar T. D., Chang S., Das S., Norkin E. and Lucas R., An Analytical and Experimental Study of a High Pressure Single Piston Pump for Gasoline Direct In-jection (GDI) Engine Applications, SAE Paper 2009-01-1504.
10. Spicher U., Kölmel A., Kubach H. and Töpfer G., Combustion in Spark Igni-tion Engines with Direct Injection, SAE Paper 2000-01-0649.
11. Stan C. C., Analysis of Engine Performances Improvement by Down Sizing in Relationship with Super and Turbo Charging, Adapted Scavenging and Direct In-jection, SAE Paper 2009-24-0075.
12. Stefan S., Optical Diagnostics on FSI Transparent Engine, FISITA World Au-tomotive Congress, Barcelona 23-27 May, Barcelona Spain, 2004.
13. Stein R. and House C., Optimal Use of E85 in a Turbocharged Direct Injection Engine, SAE Paper 2009-01-1490.

14. Stoffels H., Combustion Noise Investigation on a Turbocharged Spray Guided Gasoline Direct Injection I4-Engine, SAE Paper 2005-01-2527.
15. Stone R., Introduction to Internal Combustion Engines, SAE, Inc., 1999, Warrandale
16. Бортников Л. Н., Павлов Д. А., Шайкин А. П., Дерячев А. Д. Альтернативные топлива. Современные вопросы применения водорода в поршневых ДВС. - Самара: СамНЦ РАН, 2016. – 159 с.
21. Галиев И.Р. Характеристики распространения пламени в метановодородовоздушной смеси и концентрация несгоревших углеводородов в отработавших газах газопоршневых двигателей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тольятти, 2013. 146 с.
22. Ивашин П. В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тольятти, 2004. 152 с.
23. Шайкин А.П. Взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов с шириной зоны турбулентного горения при сгорании топливно-воздушной смеси с добавкой водорода / И.Р. Галиев, А.П. Шайкин, П.В. Ивашин, А.В. Бобровский, А.Д. Дерячев, Н.А. Дурманова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 19, № 1, 2017. – С. 64-69.
24. Шайкин А.П. Влияние пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени / А.П. Шайкин, И.Р. Галиев, А.В. Бобровский // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. - №3. – Т.15.
25. Шайкин А.П. Использование химионизации для расчета температуры углеводородного пламени / И.Р. Галиев, А.П. Шайкин // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88. - № 4. – С. 628-630.

26. Шайкин А.П. О влиянии температуры и ширины зоны турбулентного горения на показания ионизационного датчика / И.Р. Галиев, А.П. Шайкин // Журнал технической физики. - 2016. - Т. 86, вып. 8. – С. 87-89.

27. Шайкин А.П. Ивашин П.В., Галиев И.Р. Характеристики распространения пламени и их влияние на концентрацию несгоревших углеводородов при добавке водорода в топливовоздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием. Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. 203 с.

28. Шайкин А. П. О взаимосвязи концентрации углерода в топливе и характеристик распространения пламени с величиной ионного тока / А.П. Шайкин, И.Р. Галиев, С.И. Будаев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. - №4. – Т.14.

29. Шайкин А. П. Характеристики распространения пламени и их влияние на образование несгоревших углеводородов и оксида азота в отработавших газах при добавке водорода в топливно-воздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием (монография) / А.П. Шайкин, П.В. Ивашин, И.Р. Галиев, А.Д. Дерячев // Издательство Самарского научного центра РАН. – 2016. – 259 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Кинетика химии горения углеводородных топлив

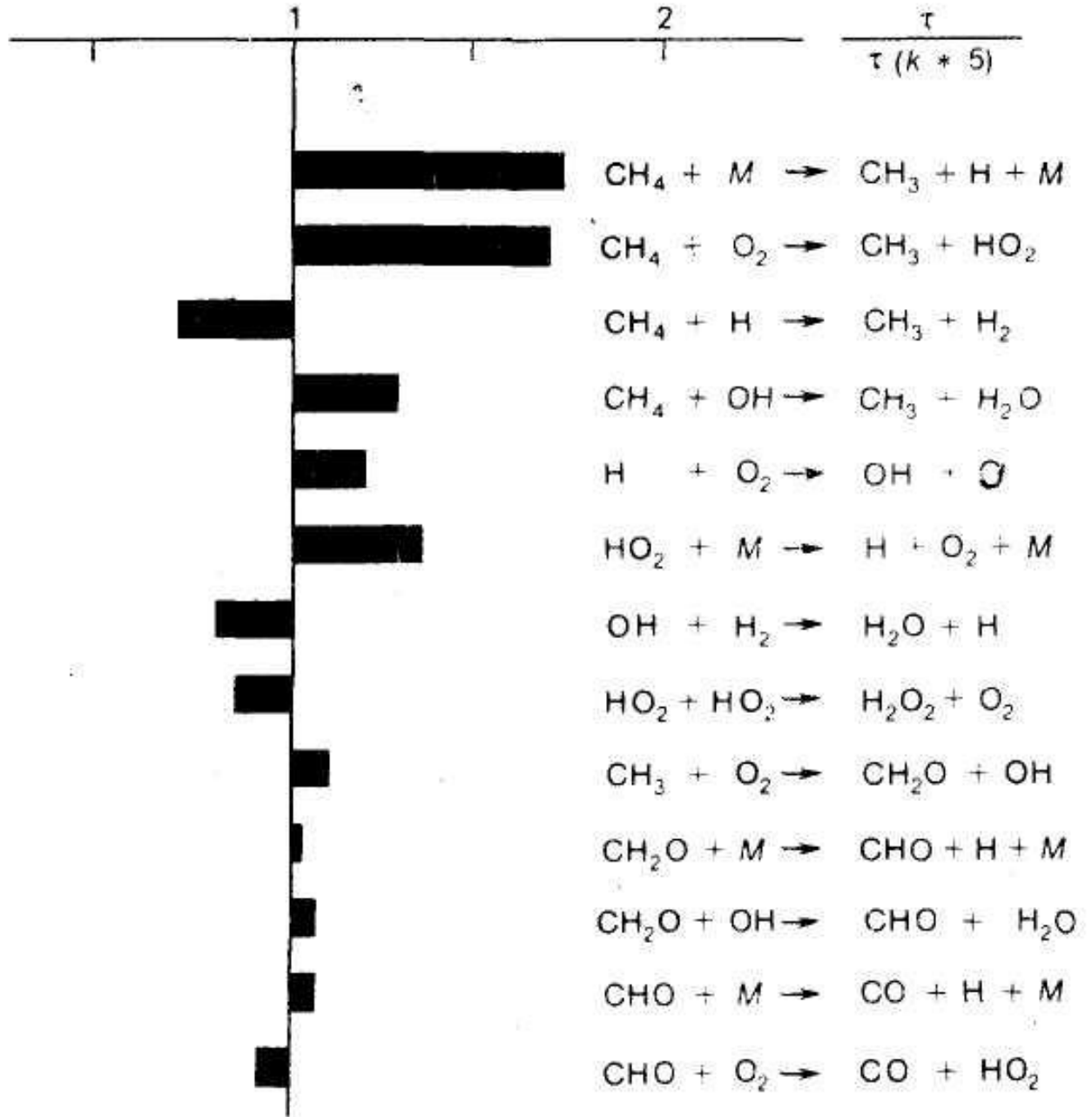


Рисунок А.1 – Влияние констант скорости химических реакций на задержку воспламенения

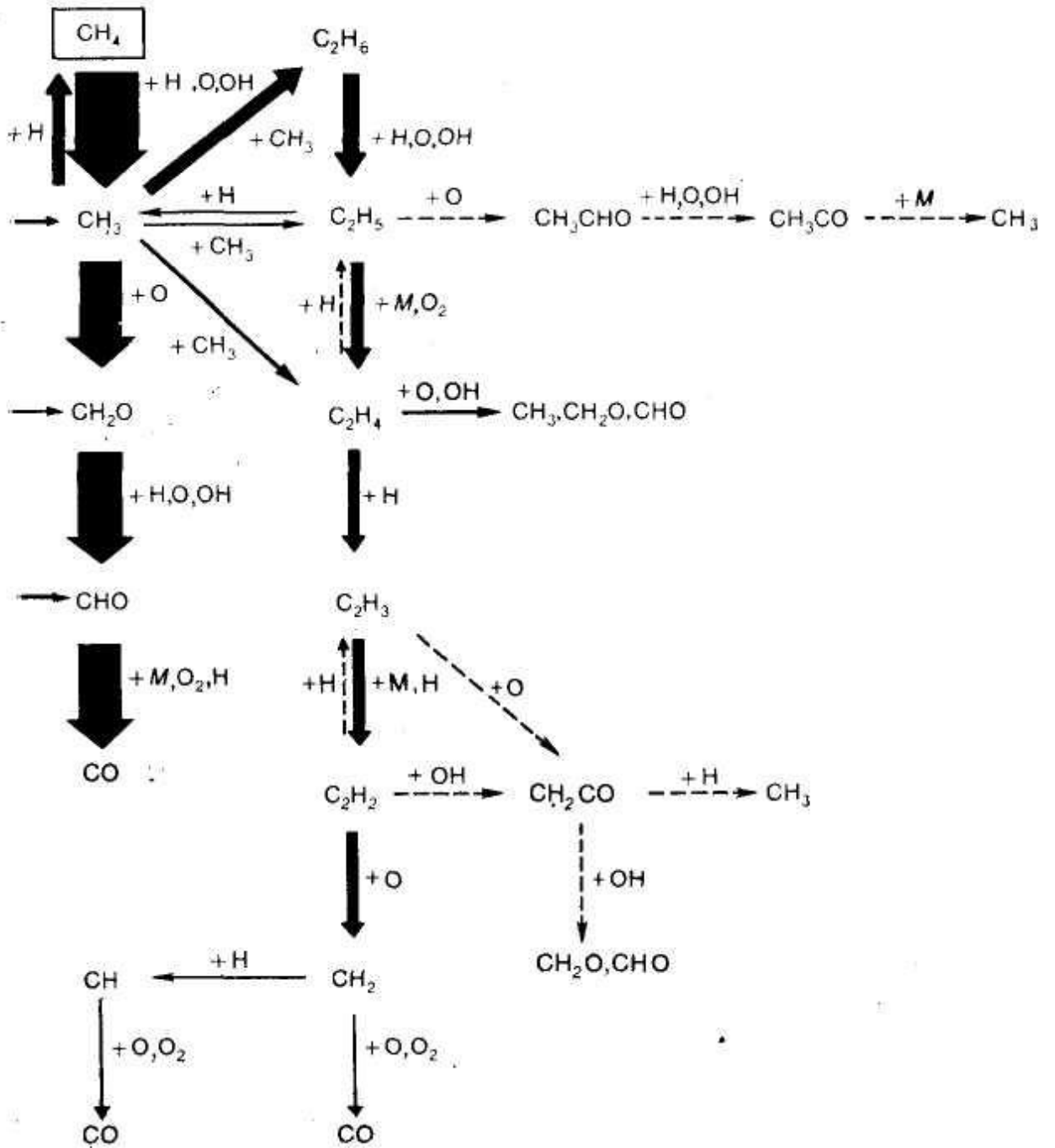


Рисунок А.2 – Схема окисления CH_4

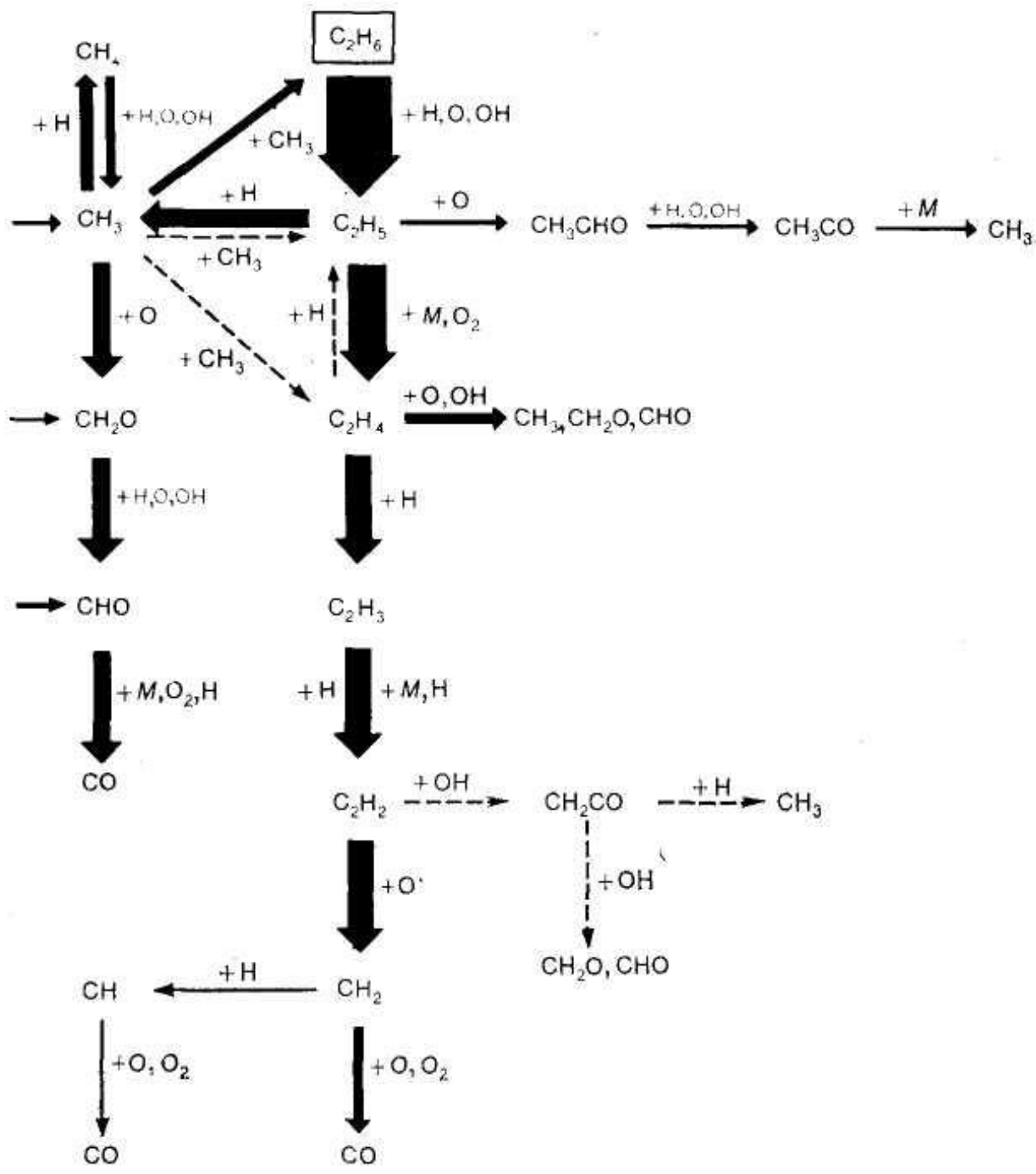


Рисунок А.3 – Схема окисления C_2H_6

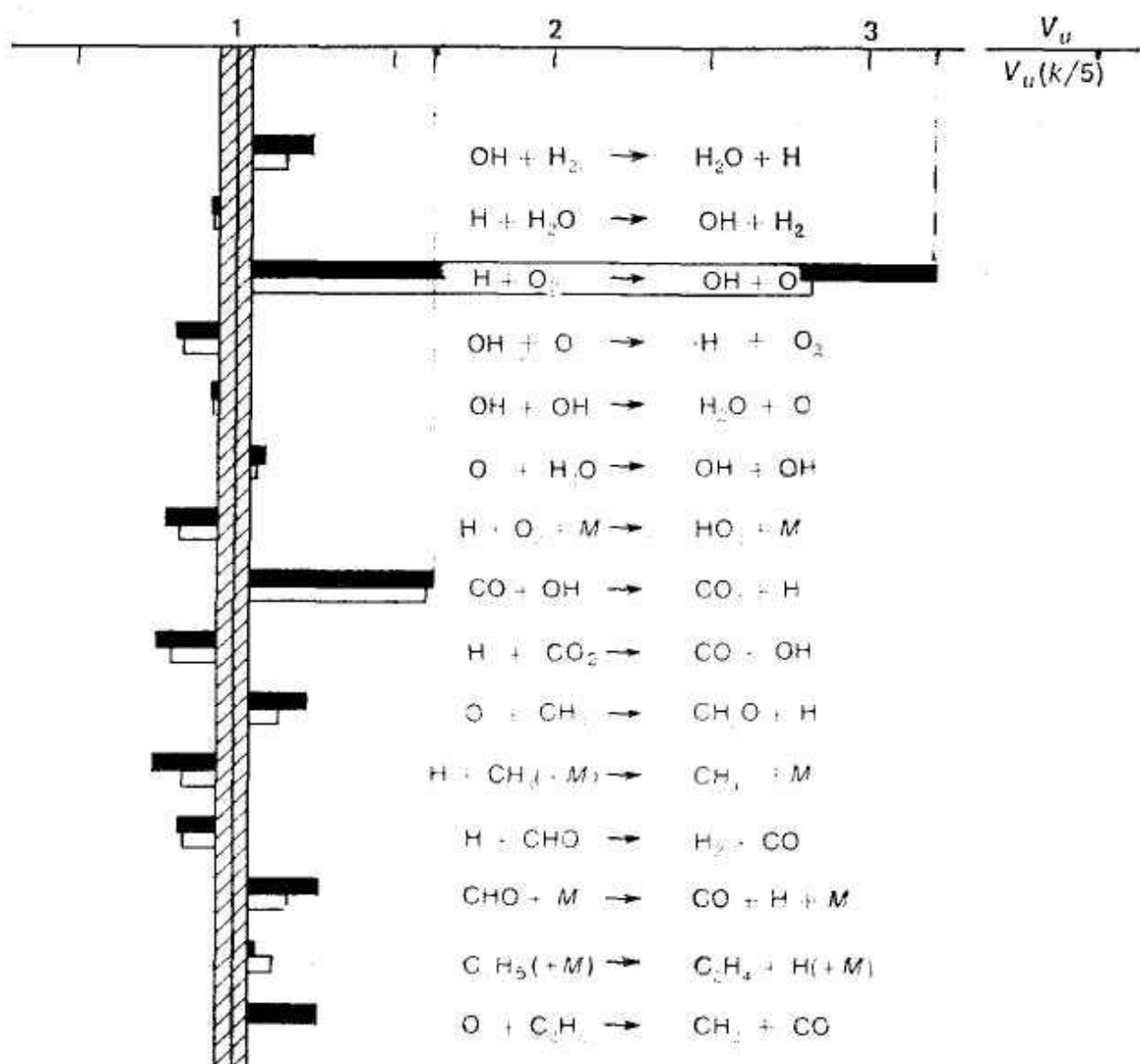


Рисунок А.4 – Влияние констант скорости химических реакций на скорость распространения пламени

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Погрешности определения коэффициента избытка воздуха и массовой доли водорода в ТВС

Погрешность определения расхода водорода

Погрешность газового счетчика, т.е. ошибка определения контрольного объема водорода V_h , л:

$$V_h := 1 \qquad \Delta g_s := 0.05$$

$$\begin{array}{l}
 \underline{T} := \begin{pmatrix} 9.5 \\ 9.1 \\ 9.2 \\ 9.4 \\ 9.3 \\ 9.3 \end{pmatrix} \\
 th := \text{mean}(T) \qquad \text{mean}(T) = 9.3 \\
 \text{var}(T) = 0.017 \qquad \underline{s} := \sqrt{\text{var}(T)}
 \end{array}$$

Коэффициент Стьюдента: $T_{\alpha n} := 2.57$

Объемный расход водорода (л/с): $G_{vh}(V, t) := \frac{V}{t}$

Ошибка определения объемного расхода водорода:

Стандартное отклонение для случайной ошибки:

$$\frac{d}{dt} G_{vh}(V, t) \rightarrow \frac{-V}{t^2} \qquad \frac{d}{dV} G_{vh}(V, t) \rightarrow \frac{1}{t} \qquad \underline{S}(V, t) := \sqrt{\left(\frac{-V}{t^2} \cdot s\right)^2} \quad (*)$$

Случайная ошибка (л/с): $\Delta s(V, t) := T_{\alpha n} \cdot S(V, t)$

Систематическая ошибка (л/с), зависящая от ошибки определения контрольного объема:

$$\Delta s_i(t) := \frac{\Delta g_s}{t} \quad (**)$$

Для конкретных значений контрольного объема времени расхода:

$$\Delta s(V_h, t_h) = 3.836 \times 10^{-3} \quad \Delta s_i(t_h) = 5.376 \times 10^{-3}$$

Итак, ошибка определения объемного расхода водорода (л/с):

$$\Delta G_{vh}(V, t) := \Delta s(V, t) + \Delta s_i(t)$$

$$\text{На данном режиме:} \quad \Delta G_{vh}(V_h, t_h) = 9.212 \times 10^{-3}$$

$$\text{В процентном соотношении относительная ошибка:} \quad \delta G_{vh}(V, t) := \frac{100 \cdot \Delta G_{vh}(V, t)}{G_{vh}(V, t)}$$

$$\text{На данном режиме:} \quad \delta G_{vh}(V_h, t_h) = 8.568$$

$$\text{Массовый расход водорода:} \quad G_{mh} := G_{vh} \cdot \rho_H$$

ρ_H - плотность водорода

Погрешность определения расхода бензина

$$\text{Ошибка определения контрольного объема бензина, л:} \quad \Delta v_f := 0.0002$$

При контрольном объеме $V_f = 10$ мл, это составляет 2%

$$\text{Контрольный объем } V_f, \text{ л} \quad V_f := 0.01$$

Значения времени (с) расхода контрольного объема бензина:

$$Tf := \begin{pmatrix} 31.8 \\ 31.4 \\ 31.5 \\ 31.6 \\ 31.7 \\ 31.6 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{ll} tf := \text{mean}(Tf) & \text{mean}(Tf) = 31.6 \\ \text{var}(Tf) = 0.017 & sf := \sqrt{\text{var}(Tf)} \end{array}$$

Объемный расход бензина (л/с): $Gvf(V1, t1) := \frac{V1}{t1}$

Ошибка определения объемного расхода бензина:

Случайная ошибка (л/с):

$$\Delta sf(V1, t1) := T_{\alpha n} \cdot \sqrt{\left(\frac{-V1}{t1^2} \cdot sf\right)^2}$$

Систематическая ошибка (л/с), зависящая от ошибки определения контрольного объема:

$$\Delta sif(t1) := \frac{\Delta vf}{t1} \quad (***)$$

Итак, ошибка определения объемного расхода бензина (л/с):

$$\Delta Gvf(V1, t1) := \Delta sf(V1, t1) + \Delta sif(t1)$$

На данном режиме: $\Delta Gvf(Vf, tf) = 9.652 \times 10^{-6}$

В процентном соотношении относительная ошибка: $\delta Gvf(V1, t1) := \frac{100 \cdot \Delta Gvf(V1, t1)}{Gvf(V1, t1)}$

На данном режиме: $\delta Gvf(Vf, tf) = 3.05$

Ошибка определения коэффициента избытка воздуха α

Плотность воздуха для данных условий (г/л): $\rho_a := 1.0624$

Объемный расход воздуха (л/с) в условиях впускного трубопровода:

Массовый расход бензина: $G_{mf} := G_{vf} \cdot \rho_f$ $G_{va} := 2.9$

ρ_f - плотность бензина

Массовый расход воздуха: $G_a(V, t) := (G_{va} - G_{vh}(V, t)) \cdot \rho_a$

Ошибка определения массовой доли водорода в топливе:

$l_f := 14.96$ $l_h := 34.78$

Плотность водорода (г/л) на данном режиме: $\rho_h := 0.0846$

Плотность бензина (г/л): $\alpha(G_{vf}, G_{vh}) := \frac{(G_{va} - G_{vh}) \cdot \rho_a}{G_{vf} \cdot \rho_f \cdot l_f + G_{vh} \cdot \rho_h \cdot l_h}$

Массовая доля водорода в топливе: $\underline{H}(G_{vh}, G_{vf}) := \frac{G_{vh} \cdot \rho_h}{G_{vh} \cdot \rho_h + G_{vf} \cdot \rho_f}$

$$dH_f(G_{vh}, G_{vf}) := -G_{vh} \cdot \frac{\rho_h}{(G_{vh} \cdot \rho_h + G_{vf} \cdot \rho_f)^2} \cdot \rho_f$$

$$dH_h(G_{vh}, G_{vf}) := \frac{\rho_h}{G_{vh} \cdot \rho_h + G_{vf} \cdot \rho_f} - G_{vh} \cdot \frac{\rho_h^2}{(G_{vh} \cdot \rho_h + G_{vf} \cdot \rho_f)^2}$$

$$\Delta\alpha(V_h, t_h, V_f, t_f) = 0.023$$

$$\Delta H(V, t, V_1, t_1) := \sqrt{\left| dH_f(G_{vh}(V, t), G_{vf}(V_1, t_1)) \cdot \Delta G_{vf}(V_1, t_1) \right|^2 + \left| dH_h(G_{vh}(V, t), G_{vf}(V_1, t_1)) \cdot \Delta G_{vh}(V, t) \right|^2}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Определение случайной ошибки измерения ионного тока

Исходные данные:

	5.469	6.86	3
	6.719	5.34	3.62
	7.031	5.38	3.68
	6.719	6.24	3
	5.938	6.9	3.54
	6.406	7	3.56
	7.188	5.48	3.76
	5.781	6.04	3.68
	5.625	6.52	3.48
	5.781	5.82	3.3
	6.094	6.08	3.64
	6.406	6.3	3.82
	6.875	5.94	2.96
	5.781	5.9	3.06
I :=	6.406	t := 6	τ := 2.8
	6.563	5.86	3.34
	6.094	5.86	3.46
	5.938	6.28	2.94
	6.25	5.44	2.8
	6.406	6.08	2.92
	6.563	6.84	3.4
	6.875	6.1	3.46
	6.094	5.56	3.14
	7.188	5.5	3.32
	7.031	5.66	3.46
	6.719	6.6	3.56
	6.25	6.12	2.98
	5.625	5.54	3.2
	6.094	6.9	3.24

$$n := \text{rows}(I) \quad n = 29$$

Средние арифметические значения параметров ионного тока:

$$sI := \text{mean}(I) \quad st := \text{mean}(t) \quad s\tau := \text{mean}(\tau)$$

$$sI = 6.342 \quad st = 6.074 \quad s\tau = 3.314$$

Проверка соответствия распределения результатов измерения амплитуды сигнала нормальному (в соответствии ГОСТ 8.207 - 76)

$$j := 0..n-1$$

Смещенная оценка среднего квадратического отклонения значений амплитуды сигнала I:

$$Ss := \sqrt{\frac{\sum_j |I_j - sI|^2}{n}} \quad Ss = 0.485$$

Составной критерий:

$$d := \frac{\sum_j |I_j - sI|}{n \cdot Ss} \quad d = 0.849$$

Табличные значения квантилей для данных значений n и доверительной вероятности:

$$d1 := 0.7404$$

$$d2 := 0.8625$$

Таким образом:

$$d1 < d < d2$$

Оценки дисперсии параметров ионного тока:

$$Vi := \text{var}(I) \quad Vt := \text{var}(t) \quad V\tau := \text{var}(\tau)$$

$$Vi = 0.235 \quad Vt = 0.244 \quad V\tau = 0.088$$

Коэффициент Стьюдента: $St := 2.048$

Доверительные границы случайной погрешности:

$$\Delta i := St \cdot \sqrt{V_i} \qquad \Delta t := St \cdot \sqrt{V_t} \qquad \Delta \tau := St \cdot \sqrt{V_\tau}$$

$$\Delta i = 0.993 \qquad \Delta t = 1.011 \qquad \Delta \tau = 0.609$$

Относительные значения случайной погрешности (в процентном соотношении):

$$\delta I := \frac{100 \cdot \Delta i}{sI} \qquad \delta t := \frac{100 \cdot \Delta t}{st} \qquad \delta \tau := \frac{100 \cdot \Delta \tau}{s\tau}$$

$$\delta I = 15.653 \qquad \delta t = 16.64 \qquad \delta \tau = 18.378$$

Определение случайной ошибки измерения тока магнитострикционного датчика проводилось аналогично.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Экспериментальная установка



Рисунок 1 – Внешний вид экспериментальной установки УИТ-85

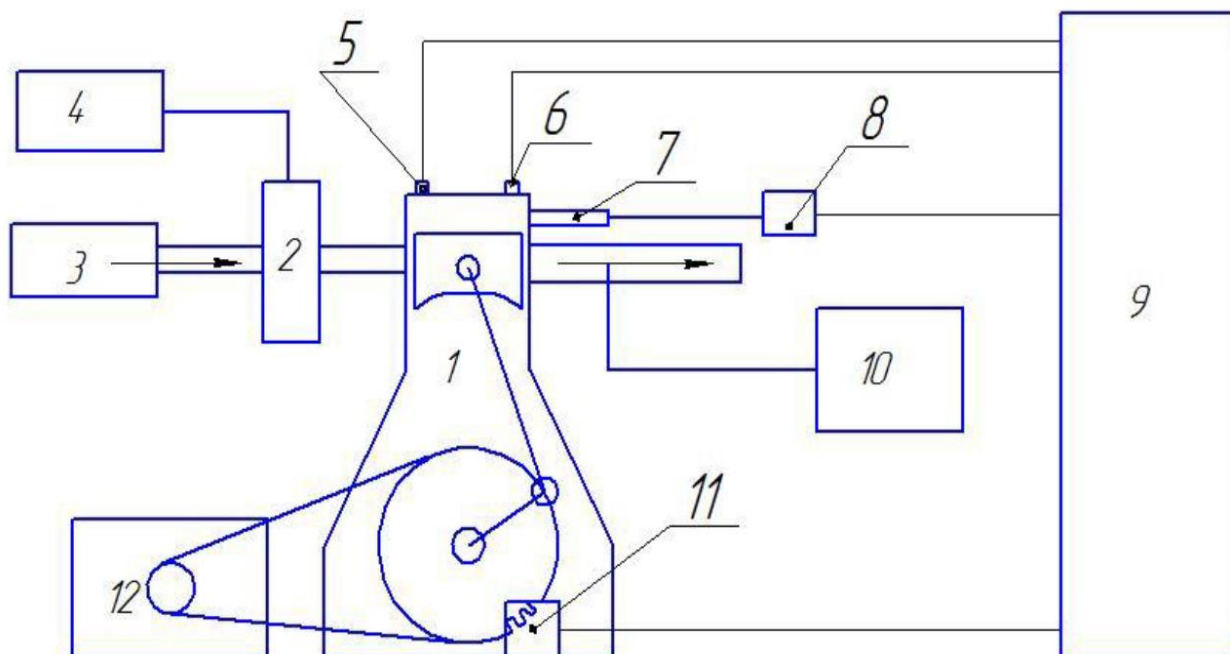


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки: 1 - УИТ-85; 2 – карбюратор; 3 - система подачи и измерения расхода воздуха; 4 - система топливоподачи и измерения расхода топлива; 5 - датчик давления в камере сгорания; 6 - ионизационный зонд; 7 - свеча зажигания; 8 - система регистрации искрового разряда; 9 - система сбора данных; 10 – газоанализатор; 11 - датчик положения коленчатого вала; 12 - электропровод коленчатого вала

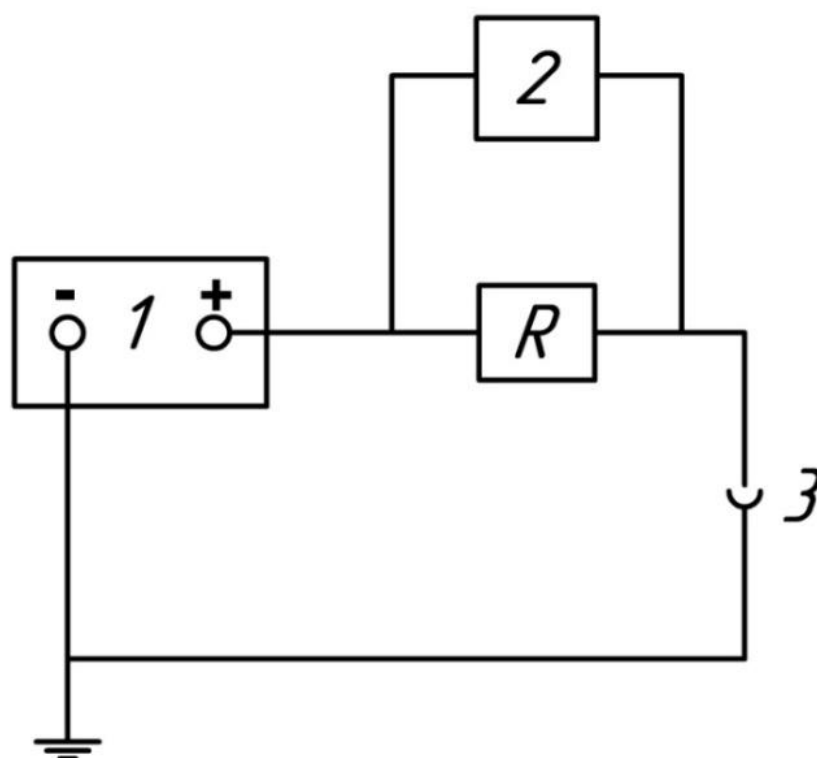


Рисунок 3 – Схема системы регистрации ионного тока:

1 – источник питания; 2 – осциллограф; 3 – ионизационный зонд.

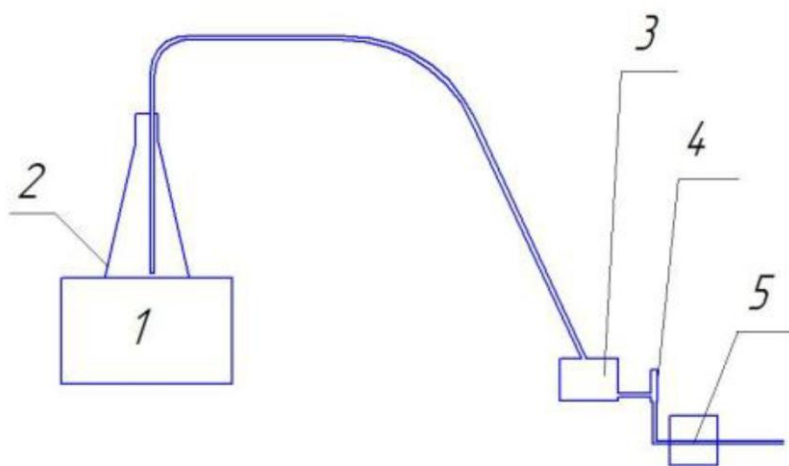


Рисунок 4 – Схема системы измерения массового расхода топлива

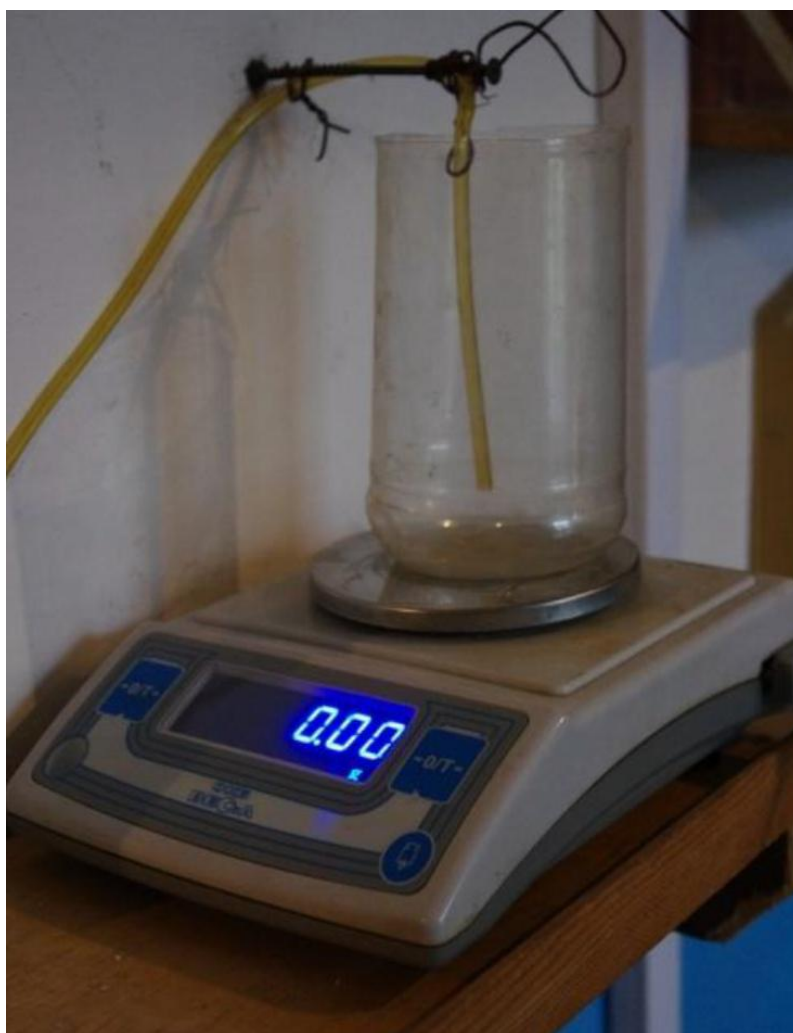


Рисунок 5 – Весы лабораторные VM 512

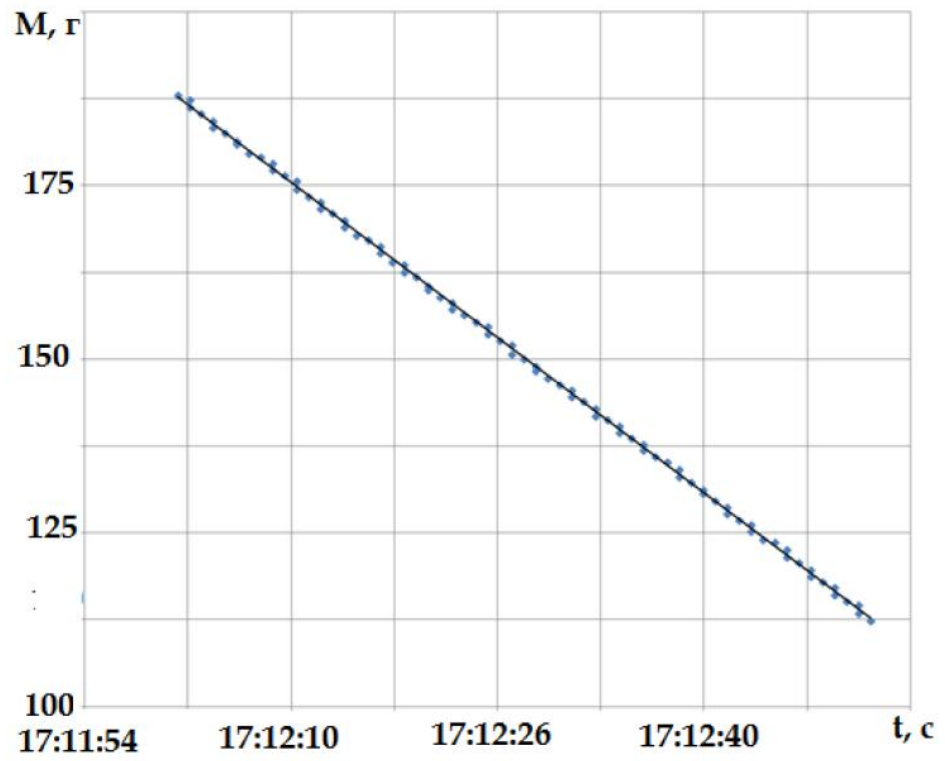


Рисунок 6 – Пример регистрации показаний весов

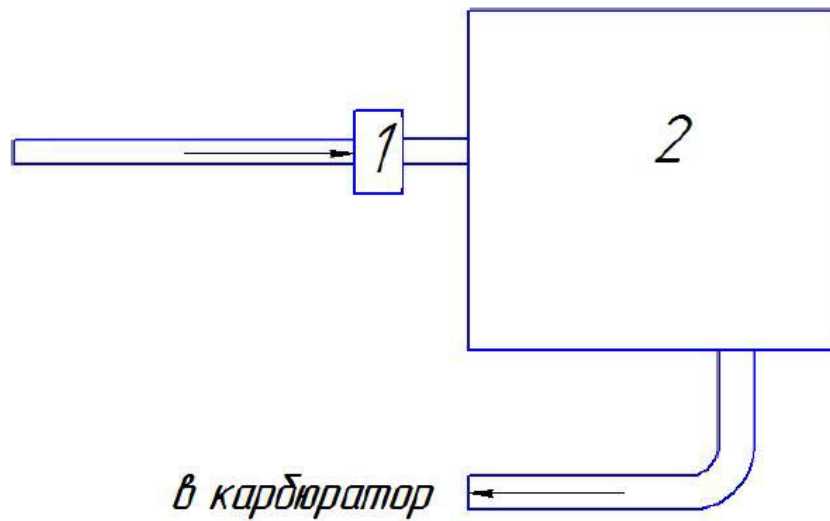


Рисунок 7 – Структурная схема системы измерения расхода воздуха:
1- датчик массового расхода воздуха, 2 – ресивер

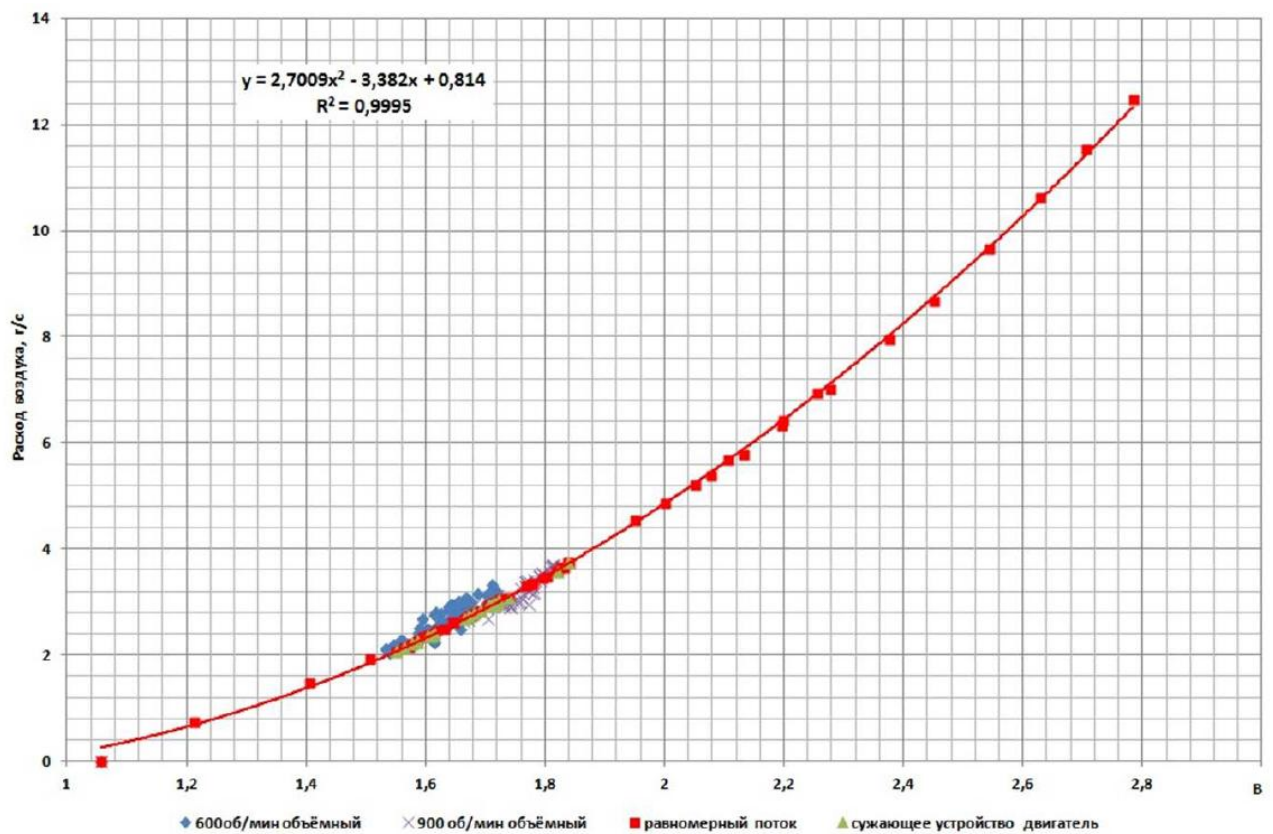


Рисунок 8 – Калибровочная кривая датчика расхода воздуха

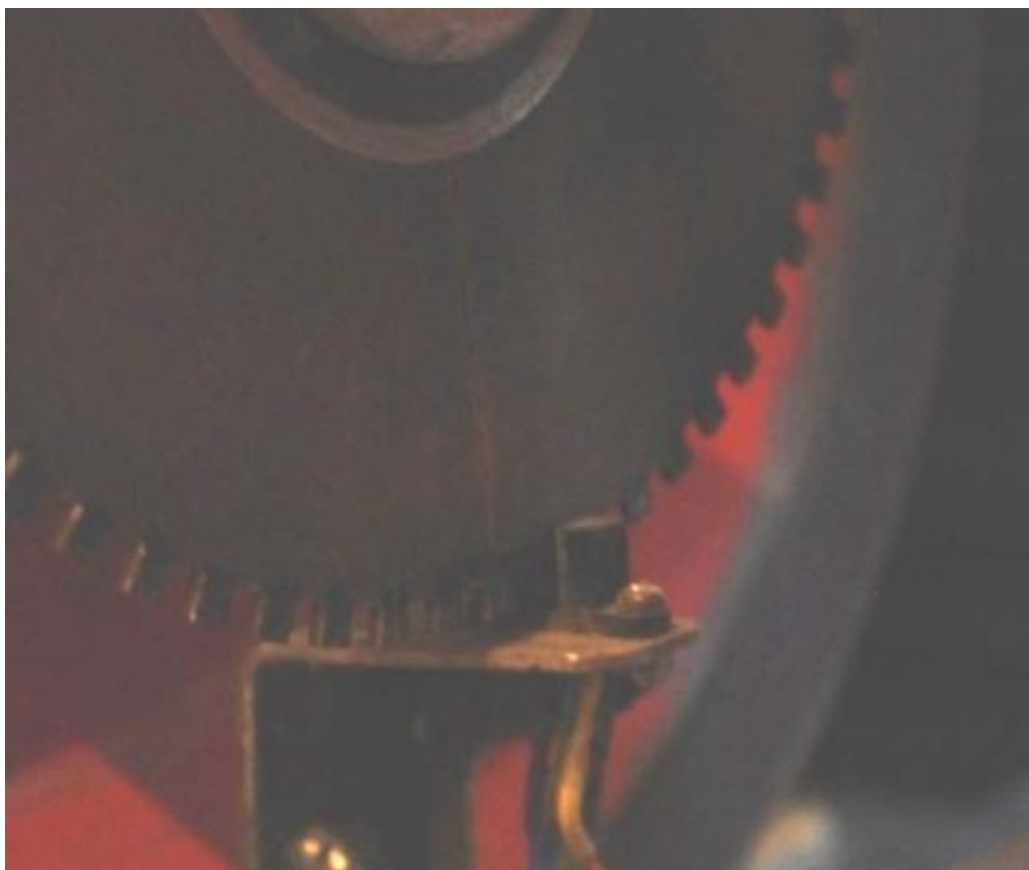


Рисунок 9 – Зубчатый диск и оптический датчик положения
коленчатого вала



Рисунок 10 – Датчик искры

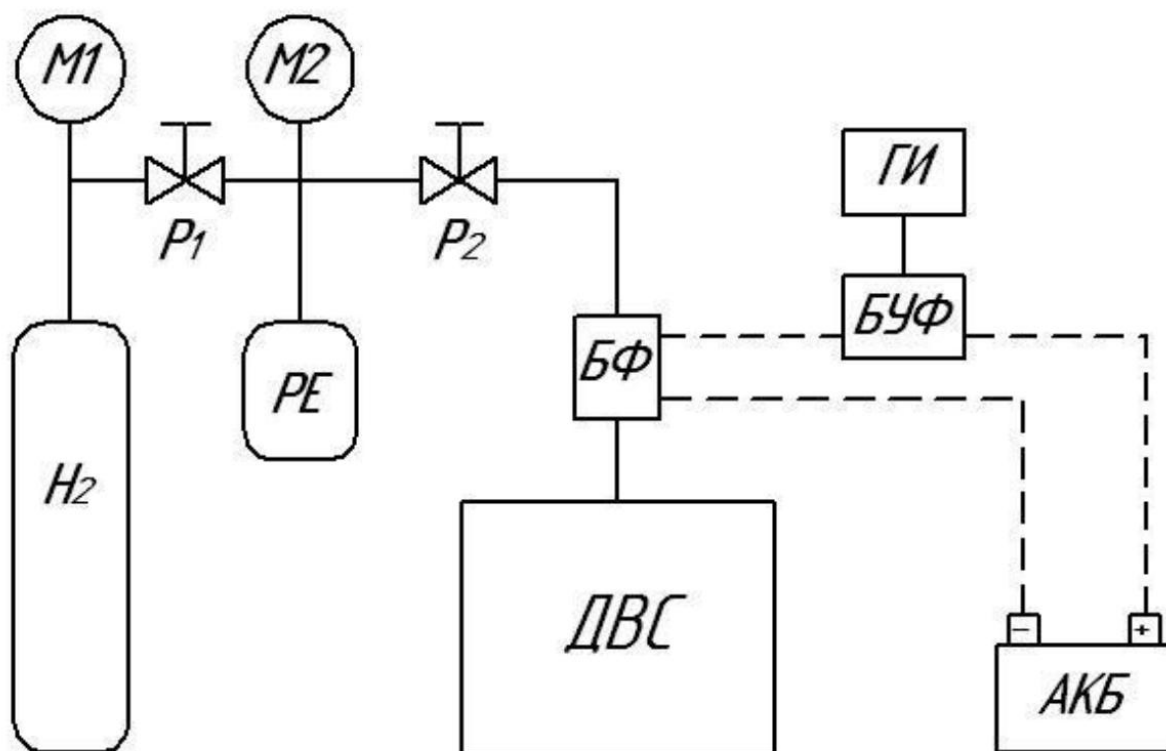


Рисунок 11 – Система подачи водорода в двигатель



Рисунок 12 – Общий вид системы подачи водорода в УИТ-85

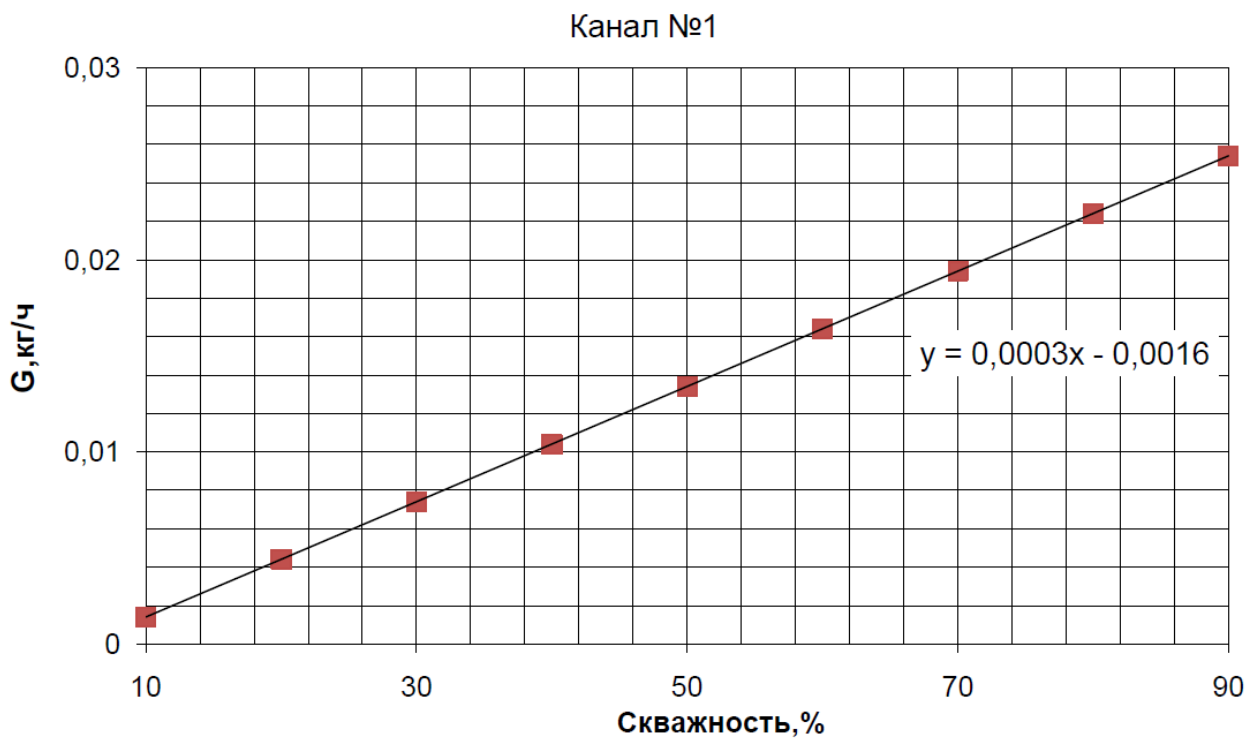


Рисунок 13 – Зависимость массового расхода водорода от скважности форсунки №1

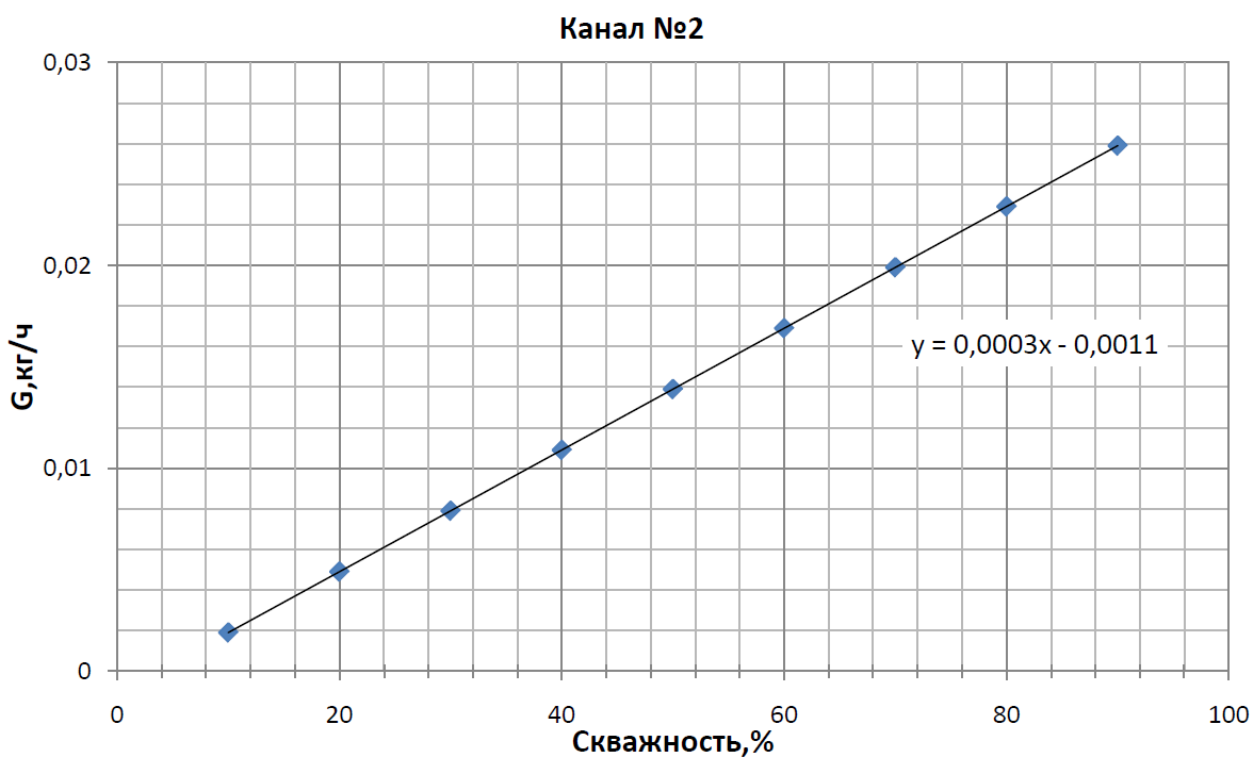


Рисунок 14 – Зависимость массового расхода водорода от скважности форсунки №2

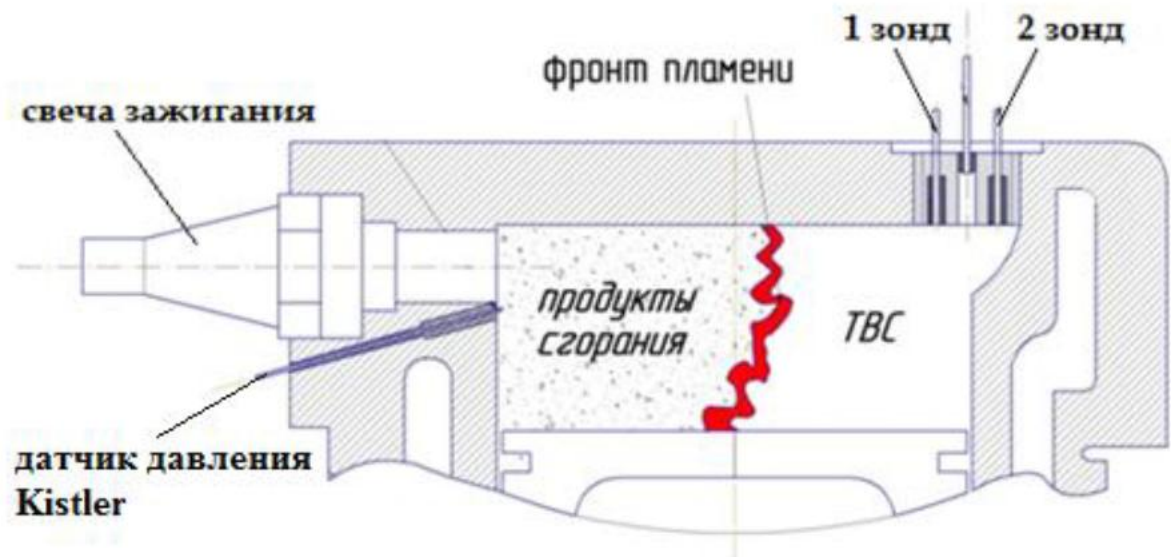


Рисунок 15 – Схема камеры сгорания с датчиками ионизации

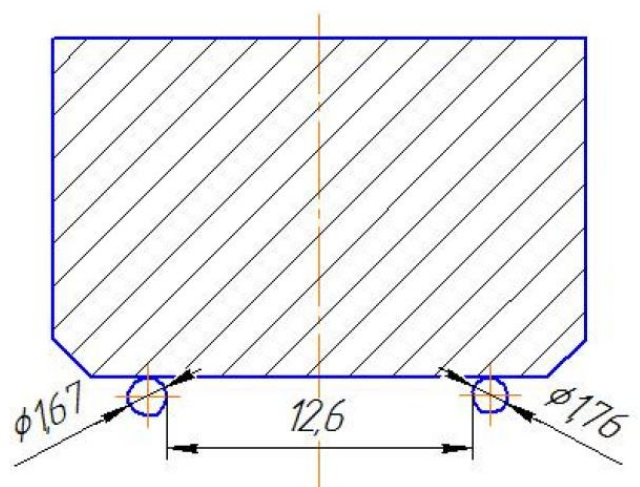
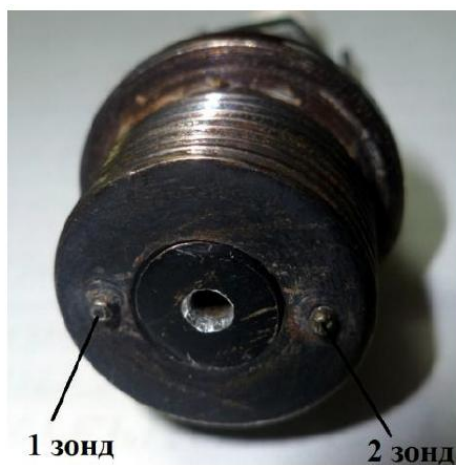


Рисунок 16 – Общий вид ИД

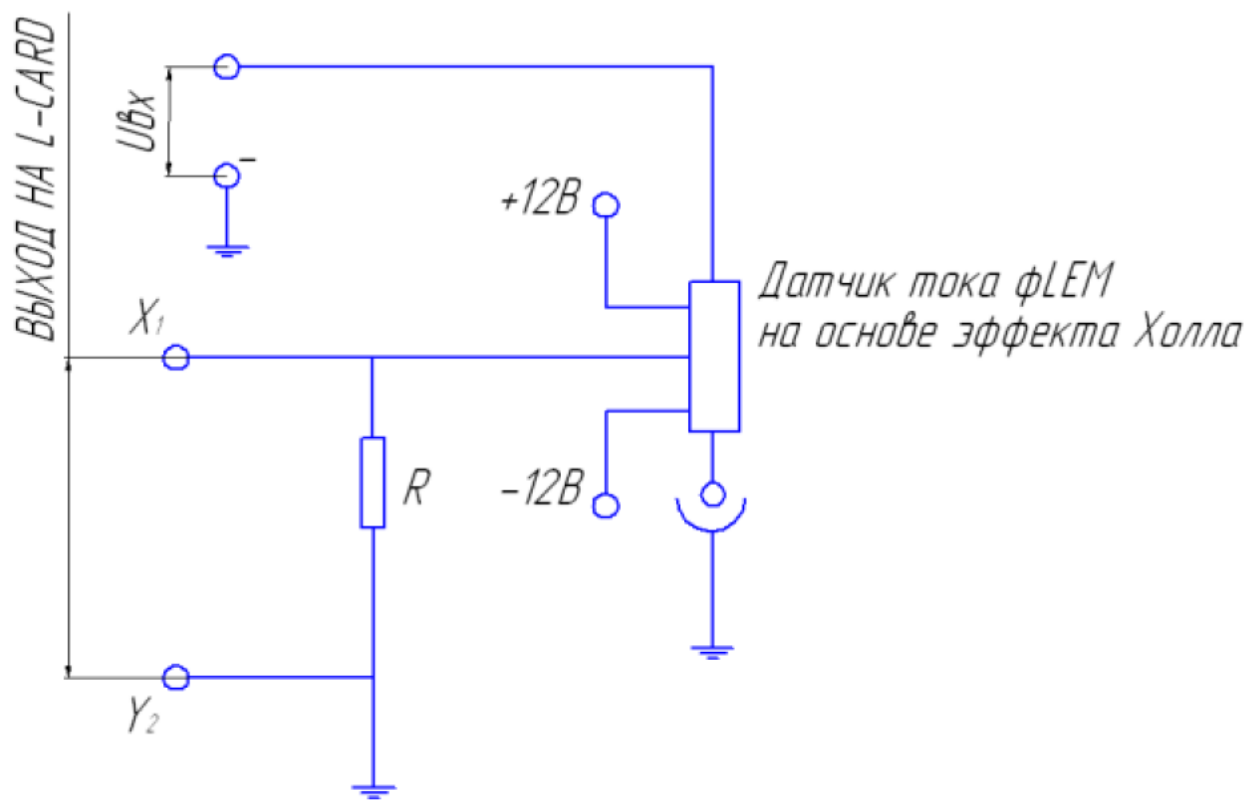


Рисунок 17 – Принципиальная схема регистрации сигналов ионного тока с гальванической развязкой

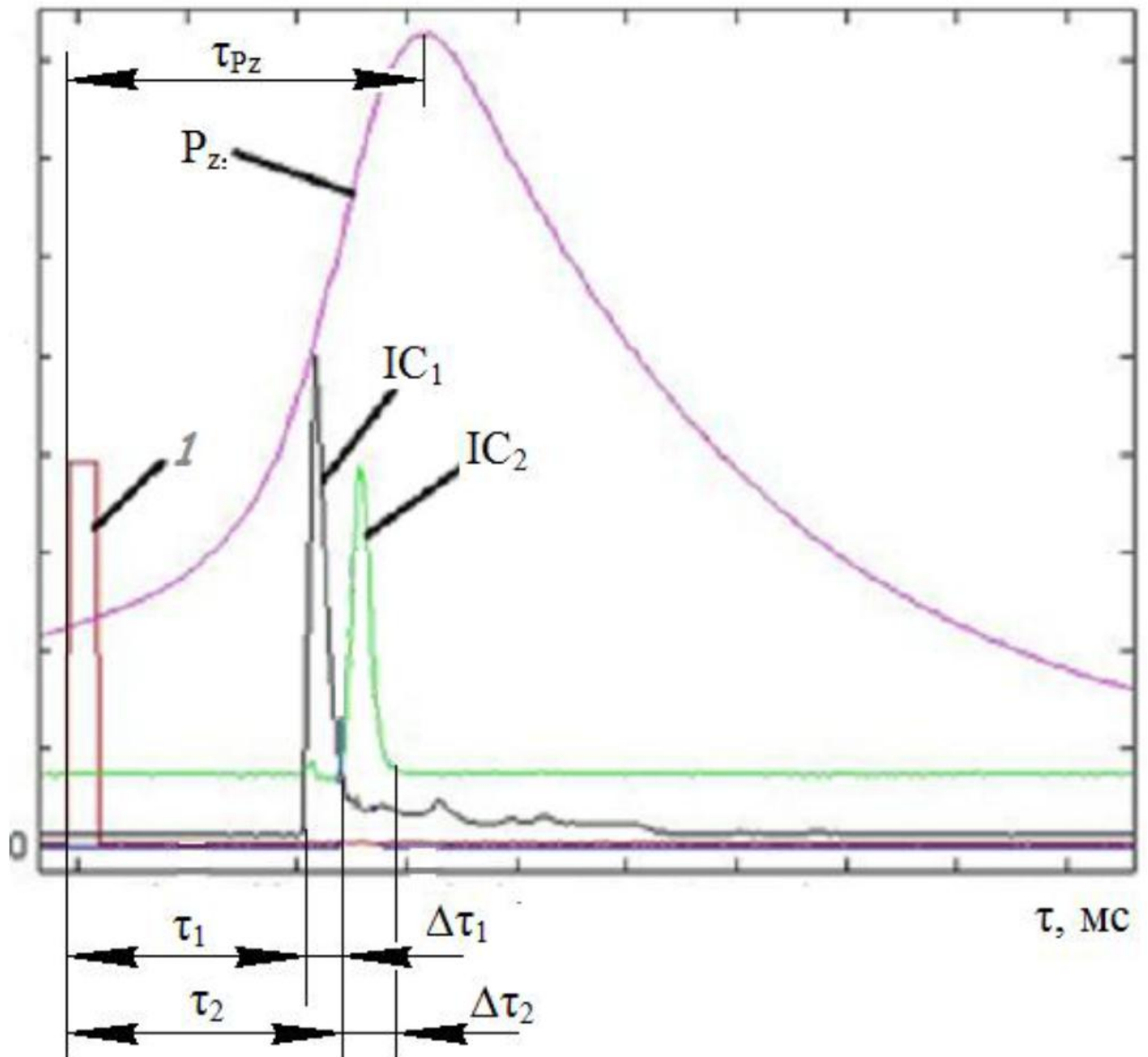


Рисунок 18 – Пример регистрации исследовательских сигналов:

1 – датчик искры



Рисунок 19 – Газоанализатор «АВТОТЕСТ»

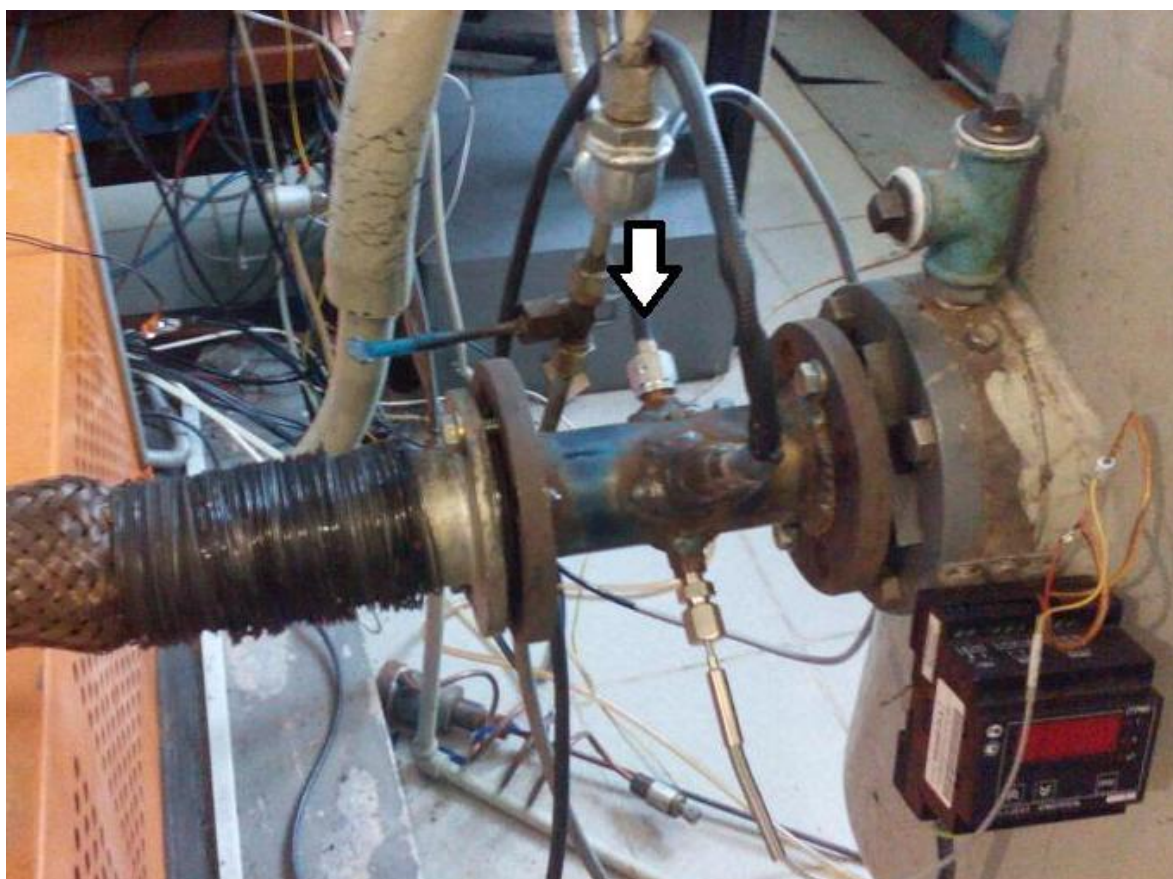


Рисунок 20 – Схема отбора пробы ОГ (показана стрелкой)