

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

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Эмпирическая методика определения концентрации  
несгоревших углеводородов в ОГ ДВС при добавке водорода в  
бензовоздушную смесь

Студент

Е.С. Желобицкая

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель  
Консультанты

А.П. Шайкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.т.н., профессор А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**Допустить к защите**  
Заведующий кафедрой

к.т.н. Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Состояние вопроса. Цели и задачи исследования.....	10
1.1 Механизм образования несгоревших углеводородов в цилиндре ДВС с искровым зажиганием.....	10
1.2 Сравнение результатов расчёта и данных экспериментов по определению объёмной концентрации несгоревших углеводородов.....	14
1.3 Особенности распространения пламени и его основные параметры в двигателях внутреннего сгорания .....	16
1.3.1 Основные понятия о скорости распространения пламени в тепловом поршневом двигателе .....	18
1.3.2 Средняя видимая скорость распространения пламени в промежутке времени основной фазы сгорания.....	20
1.3.3 Определение видимой средней скорости распространения пламени во II фазе сгорания.....	23
1.3.4 Средняя скорость распространения пламени в двигателе внутреннего сгорания в III фазе горения.....	25
1.4 Ширина зоны турбулентного горения.....	27
1.5 Влияние конструкции камер сгорания на характеристики течения и турбулентности ТВС в двигателе.....	32
Выводы к главе 1.....	44
Глава 2. Экспериментальное оборудование и методики проведения испытаний.....	46
2.1 Экспериментальное оборудование .....	46
2.2 Описанием методики проведения эксперимента .....	50
Глава 3. Взаимосвязь максимального давления сгорания и времени его достижения с шириной зоны турбулентного горения.....	65
3.1 Определение максимального давления сгорания и времени его достижения.....	65

3.2 Взаимосвязь максимального давления сгорания и времени его достижения с шириной ЗТГ .....	70
Глава 4. Разработка параметра, обобщающего взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов с максимальным давлением сгорания.....	78
4.1 Методика для прогнозирования концентрации несгоревших углеводородов, предназначенная для стадий проектирования и доводки поршневых энергетических установок.....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	84
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	86

## ВВЕДЕНИЕ

Автомобиль на нынешний день стал неотъемлемой частью жизни практически у каждого человека в мире. Автомобилестроение прогрессирует с каждым годом, улучшая и разрабатывая все возможные системы транспорта и его строение. Но, не смотря на новизну и образование гибридных двигателей и электродвигателей, большая часть человечества так же пользуются автомобилями на двигателях внутреннего сгорания. Которые в свою очередь тоже достаточно оснащены хорошей конструкцией, компьютерами и «умными» системами. Несмотря на это, эффективный коэффициент полезного действия данных бензиновых двигателей все еще остается около отметки в 30%, у дизельных двигателей близ 50%.

В нынешний момент вопрос защиты окружающей среды от вредных загрязнений волнует практически весь мир. Использование автотранспорта в наше время привело к тому, что основным источником загрязнения кроме химических и промышленных заводов, является автотранспорт. По выбросам вредных химических веществ двигателями внутреннего сгорания Россия лидирует между многими странами мира. Для того чтобы уменьшить количество выбросов вредных для здоровья химических веществ в окружающую среду, вызванного увеличением роста автомобилей, правительства многих стран мира используют законодательные документы и нормативы, которые могут помочь контролировать выбросы токсичных веществ в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания. Отсюда следует, требования к экологическим нормам к каждому выпускаемому автотранспорту с каждым годом становится жестче и труднее соответствовать им.

Экологическая характеристика автотранспорта тесно связана с его топливной экономичностью. Чем автомобиль расходует меньше горючего при эксплуатации, тем значительно снижается выброс вредных отработавших газов, токсичных выделений, и, следовательно, ущерб, наносимый окружающей среде.

Имеется ряд факторов, которые влияют и на топливную экономичность автомобиля, и на токсичность отработавших газов его двигателя. На экологические характеристики автомобиля оказывают существенное влияние несколько конструктивных и эксплуатационных факторов ДВС: вид, технические характеристики, вентиляция картера, топливо, нейтрализаторы, порядок движения, так же опыт водителя транспортного средства.

Таким образом, основные мероприятия по ограничению токсичных выбросов, загрязняющих окружающую среду при эксплуатации автомобильным транспортом заключаются в совершенствовании тепловой энергетической установки и поддержании соответствующего технического состояния.

Одним из основных важных мероприятий является создание конструкций двигателей внутреннего сгорания (ДВС) нового поколения, использующие топливно-воздушные смеси (ТВС) с добавкой газообразных активаторов горения.

В настоящее время основной упор разработок по снижению токсичности отработавших газов направлен на совершенствование систем питания и зажигания ДВС, так как их рабочие характеристики во многом определяют характеристики процессов воспламенения и сгорания ТВС.

Различными автостроительными фирмами совершенствование ДВС ведётся в следующих основных направлениях:

- улучшение смесеобразования при впрыске топлива во впускную систему;
- совершенствование распыливания топлива при его подаче непосредственно в цилиндры;
- включение при необходимости регулятора принудительного холостого хода;
- обеспечение равномерного распределения топливно-воздушной смеси в цилиндрах двигателя на всех режимах эксплуатации автомобиля;
- использование альтернативных видов топлива, при необходимости с

газообразными активаторами горения, например, водорода.

### Актуальность

Актуальность данной работы заключается в возможности расчетным путем определять количество несгоревших углеводородов при работе двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием при использовании газообразного активатора горения.

Цель работы: разработать методику определения концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах с учётом параметров сгорания и соотношения углерода и водорода в топливно-воздушной смеси.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Определить взаимосвязь ширины зоны турбулентного горения около стенки камеры сгорания с максимальным индикаторным давлением сгорания для изменяющихся в широком диапазоне составов смеси, скоростных режимов и количества водорода, добавляемого в ТВС.
- Определить закономерности, связывающие ширину зоны турбулентного горения с временем достижения максимального значения индикаторного давления относительно подачи зажигания.
- Определить зависимость концентрации несгоревших углеводородов от характеристик распространения пламени.
- Предложить безразмерный параметр для расчётного определения концентрации несгоревших углеводородов в ОГ по характеристикам сгорания в конце основной фазы сгорания топливно-воздушной смеси.

Объект исследования - процесс сгорания углеводородного топлива в тепловой энергетической установке транспортного средства с искровым зажиганием.

Предмет исследования – эмпирическая методика расчета определения концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах, основанная на использовании параметров сгорания топливно-воздушной смеси.

Научная новизна работы определяется следующими положениями:

1 Определены закономерности, связывающие максимальное давление сгорания с шириной зоны турбулентного горения при изменении коэффициента избытка воздуха, 2-х скоростных режимов работы двигателя и количества газообразного водорода в топливно-воздушной смеси.

2 Разработан параметр, обобщающий концентрацию несгоревших углеводородов с максимальным давлением сгорания и относительным содержанием углерода и водорода в ТВС.

Теоретическое значение работы.

Обоснована и математически показана закономерность, связывающая основные характеристики сгорания ТВС у стенок камеры сгорания (завершение основной фазы сгорания) и концентрацию несгоревших углеводородов в отработавших газах.

Практическое значение работы определяется следующим:

1 Обоснованы и получены закономерности, связывающие максимальное значение давления сгорания и время его достижения с шириной зоны турбулентного горения у стенок камеры сгорания.

2 Предложенная расчётная методика предназначена для определения концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах при использовании в процессе проектирования или доводке поршневых энергетических установках.

Результаты исследований, представленных в диссертации, предназначены для ускорения и удешевления процессов проектирования и доводки ДВС, работающих на углеводородном топливе, в том числе с применением газообразного активатора горения, а также при подготовке бакалавров, магистрантов и аспирантов по направлениям и программам, связанных с проектированием и эксплуатацией поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания.

### **Методы исследования.**

Исследование проводилось с привлечением методов статистической обработки результатов испытаний, аналитической обработкой, анализом и обобщением опубликованных результатов теоретических и экспериментальных исследований из отечественных и зарубежных источников.

### **На защиту выносятся.**

1. Закономерности, связывающие максимальное давление сгорания и время его достижения относительно начала зажигания с шириной зоны турбулентного горения в процессе завершения сгорания в зависимости от состава смеси, скоростных режимов работы и впрыскиваемого газообразного водорода, полученные при обработке результатов исследований и их анализе.

2. Параметр, обобщающий концентрацию несгоревших углеводородов с максимальным давлением сгорания и относительным содержанием углерода и водорода в ТВС.

3. Методику для прогнозирования содержания несгоревших углеводородов в процессе разработки, а также доводке тепловых энергетических установок, основанную на использовании изменения максимального давления сгорания и относительного содержания углерода и водорода в ТВС.

**Достоверность** полученных результатов исследования обусловлена обработкой большого объема опубликованных экспериментальных данных отечественных и зарубежных исследователей, применением методов статистической обработки данных, непротиворечивостью полученных экспериментальных данных и результатов их анализа с основными положениями теории горения.

### **Реализация результатов работы.**

Материалы работы применяются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.04.03 «Энергетическое

машиностроение».

**Апробация работы.**

Результаты исследования докладывались на научно-технических семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета в 2015 – 2017 годах и на следующих конференциях: IV международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов» Тольяттинский государственный университет, Тольятти – 2016; Студенческих научных конференциях Тольяттинского университета 2015-2017 г.г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 2 статьи.

**Структура и объем диссертации.** Диссертации состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 120 наименований. Работа изложена на 81 страницах машинописного текста, иллюстрированного 1 таблицей и 32 рисунками.

## Глава 1. Состояние вопроса. Цели и задачи исследования

### 1.1 Механизм образования несгоревших углеводородов в цилиндре ДВС с искровым зажиганием

В соответствии с новыми установившимися требованиями правительств различных стран мира к организациям автомобилестроения, они должны контролировать и следовать нормативам к содержанию следующих токсичных компонентов в отработавших газах (ОГ) автотранспорта с бензиновыми двигателями: окиси углерода (СО), углеводородов (СН) и окислов азота (NO<sub>x</sub>).

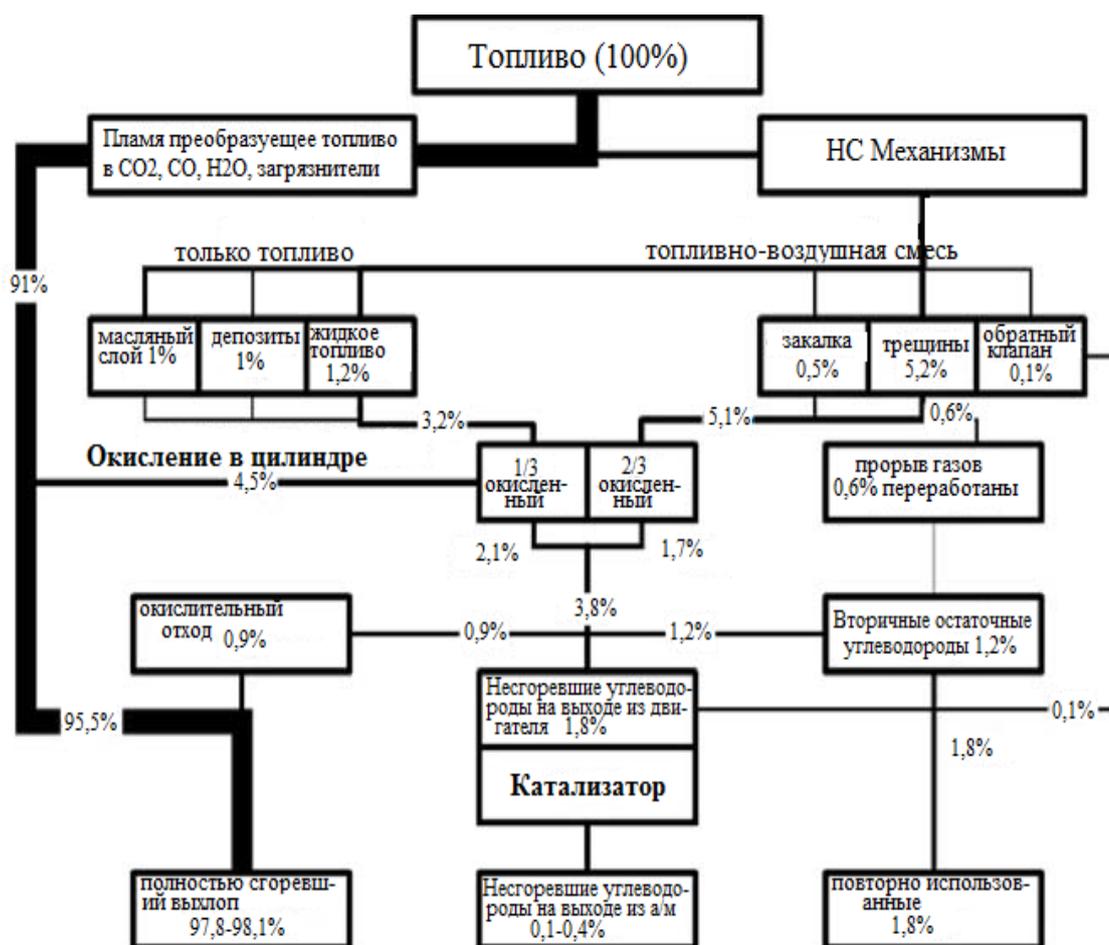


Рисунок 1.1.1 Сгорание и окисление топлива в цилиндре ДВС и его системах

Для настоящего времени статистические обработки результатов многочисленных экспериментальных исследований двигателей с внешним смесеобразованием, имеющих различную конструкцию, а также результаты их анализа показал (диаграмма рисунка 1.1.1) [1], что в течении такта расширения сгорает около 90% топлива [58]. Оставшиеся 10%, без использования каталитического дожигания, частично окисляются в цилиндре в процессе такта выпуска и выпускной системе, создавая дополнительные потери. На выходе в атмосферу выбрасывается порядка 2% несгоревшего топлива.

Одной из самых актуальных задач на данный момент является повышение полноты сгорания в рабочем ходе двигателя автотранспорта больше 90 % и, тем самым снижение выбросов несгоревших углеводородов (НСН) из цилиндров двигателя.

Образование несгоревших углеводородов в камере сгорания (КС) поршневого двигателя внутреннего сгорания обусловлено местным погасанием пламени [45, 116, 118]. Условие прекращения горения можно записать в следующем виде[50]:

$$Q_1 \leq Q_2 \quad (1)$$

В этом выражении  $Q_1$  – отражает скорость тепловыделения, Дж/с;

$Q_2$  – характеризует скорость отвода тепла от зоны горения в стенки КС и свежую ТВС и, Дж/с

Есть две важных коренных причины образования НСН: прекращение химических реакций горения вблизи стенок КС и в зазорах, а также погасание пламени в локальных объемах КС из-за превышения времени сгорания молей ТВС, поступающих за счёт турбулентного обмена в зону продуктов сгорания, по сравнению со временем существования этих молей ТВС [33, 44,116].

В сущности, при приближении пламени к стенкам КС на расстояние меньшем 1 мм происходит охлаждение зоны химических реакций горения до их прекращения, сопровождающееся погасанием пламени, При этом также

осуществляется рекомбинация активных радикалов во фронте пламени до нейтральных молекул. Результатом этих процессов является образование несгоревших углеводородов различного состава. Погасание пламени в общем случае осуществляется и параллельно, и под некоторым углом по отношению к стенкам КС [14]. В этом случае появление так называемого «замороженного» слоя несгоревших углеводородов обусловлено погасанием пламени в непосредственной близости от стенок камеры сгорания. Размеры этого слоя, площадь поверхности и толщина, определяются давлением и температурой несгоревшей смеси при погасании пламени, коэффициента избытка воздуха и температурой внутренних стенок цилиндра [63, 115].

Как было рассмотрено выше образование НСН при сгорании ТВС происходит из-за местного погасания пламени из-за снижения интенсивности протекания химических реакций в зоне горения и за этой зоной, куда за счёт турбулентного обмена попадают моли свежей ТВС, что приводит к уменьшению скорости распространения пламени.

Рассмотрим элементы моделей, объясняющих наличие зон существования несгоревших углеводородов при сгорании ТВС в конце такта расширения и в такте выпуска продуктов сгорания.

Модель образования НСН при сгорании ТВС при различном положении поршня в цилиндре ДВС приведена на рисунке 1.1.2 [110]. В соответствии с представленной моделью погасание пламени при приближении к стенкам КС вызывает образование трёх «замороженных» слоёв несгоревших углеводородов и зазор, в котором также происходит погасание пламени. При завершении такта расширения, происходит вытекание несгоревшей ТВС из зазора между поршнем и уплотнительным кольцом и распространение её вдоль стенок КС. При открытии выпускного клапана «замороженные» слои, расположенные у стенки, взаимодействуют с продуктами сгорания, частично догорают в этом процессе и вместе с ними поступают в выпускную систему. Перемещение поршня в направлении верхней мёртвой точки вызывает соскабливание замороженного слоя НСН с

образованием вихревого течения, что улучшает процесс догорания НСН в такте выпуска. Щели между элементами камеры сгорания являются источниками интенсивного охлаждения. В них пламя не может распространяться из-за отсутствия условий для обеспечения протекания химических реакций горения [44, 111, 103, 118].

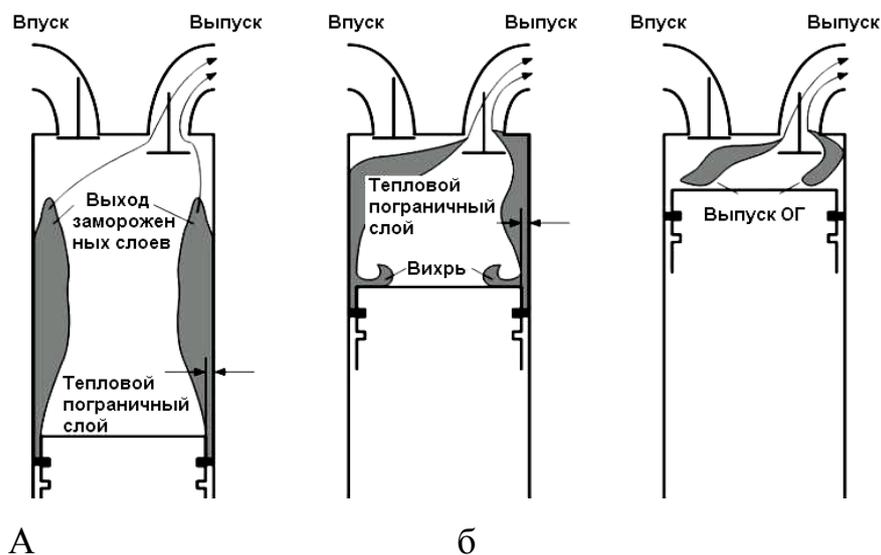


Рисунок 1.1.2 –Процессы при образовании несгоревших СН: а – замороженные слои в такте расширения; б – вихреобразование в такте выпуска; в – завершение выпуска в ВМТ .

Между элементами камеры сгорания образуются зазоры и щели, в которых происходит погасание пламени. Эти щели образуются вместе стыка клапанов с головкой цилиндра, в месте соединения блока цилиндров с его головкой, а также зазор, существующий между цилиндром, поршнем и уплотнительным кольцом (рисунок 1.1.3) [104, 108]. Основная часть топливно-воздушной смеси в этих щелях и зазоре не способна к воспламенению и горению в процессе рабочего хода поршня из-за пониженной температуры среды. В процессе тактов расширения и выпуска происходит догорание лишь незначительного количества ТВС, вытекающей из щелей и зазора при падении давления [108].

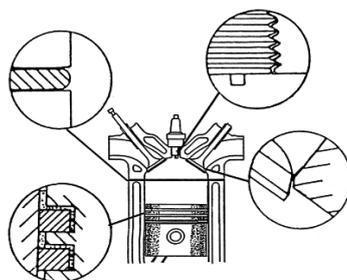


Рисунок 1.1.3 – Щели и зазор между элементами камеры сгорания.

## 1.2 Сравнение результатов расчёта и данных экспериментов по определению объёмной концентрации несгоревших углеводородов

Методика расчетного определения объёмной доли несгоревших углеводородов (НСУ) в отработавших газах [4] содержит 2-а раздела:

1) Рассматривается образование замороженного слоя ТВС из-за погасания пламени при взаимодействии с пограничным слоем у стенок камеры сгорания. Объём слоёв несгоревшей смеси определяется такими параметрами как давление, температура при погасании пламени, коэффициент избытка и температурным состоянием стенок камеры сгорания. Полученный экспериментально основной параметр для определения концентрации несгоревших углеводородов - толщина несгоревшего слоя,  $q$ , от перечисленных выше параметров представляется в следующем виде:

$$q = q_r \cdot \left( \frac{p_r}{p} \right)^\beta \cdot \left( \frac{T_r}{T} \right)^\gamma,$$

$p$  – давление в слое, атм;

$T$  – температура слоя несгоревшей смеси, К;

$\beta$  и  $\gamma$  – полученные экспериментально показатели степени;

$r$  – индекс, обозначающий параметры в начальных условиях.

2) Зависимость для определения несгоревшей массы углеводородов, находящихся в щелях и зазоре, в которых прекращается распространение пламени, разработана по результатам экспериментов:

$$m_{\text{CH}} = \frac{V \cdot F \cdot \rho(p, T)}{1 + F}, \quad (1)$$

$V$  – объем щелей и зазора, м<sup>3</sup>;

$F$  – эквивалентное отношение расхода топлива к воздуху – величина, обратная коэффициенту избытка воздуха,  $\alpha$ ;

$\rho$  – плотность углеводородовоздушной смеси, соответствующая давлению и температуре в период времени когда происходит погасание пламени, кг/м<sup>3</sup>.

Сравнение расчётных данных с результатами эксперимента при использовании бензина в качестве топлива представлено на рис. 1.2.1. Наблюдается большой разброс сравниваемых величин при превышении экспериментальных значений над расчётными, превышающий 100%.

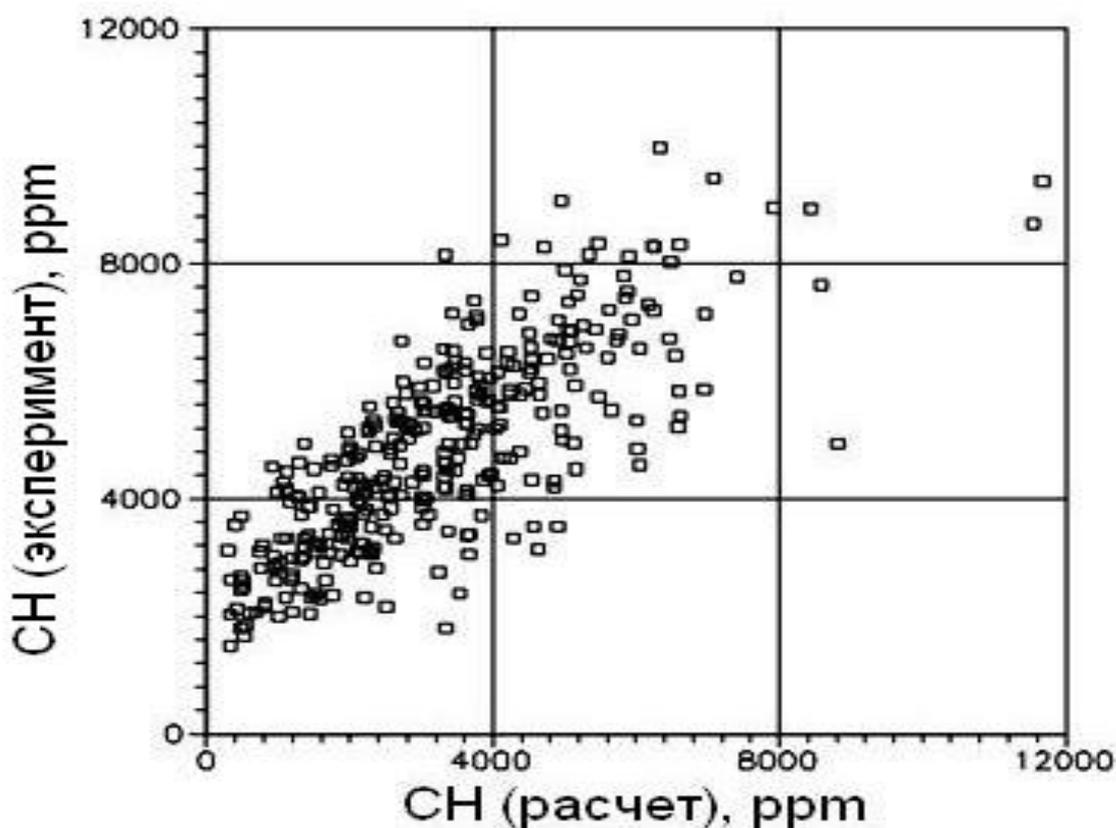


Рисунок 1.2.1 – Сравнение экспериментальных и расчётных данных по концентрации несгоревших СН в отработавших газах

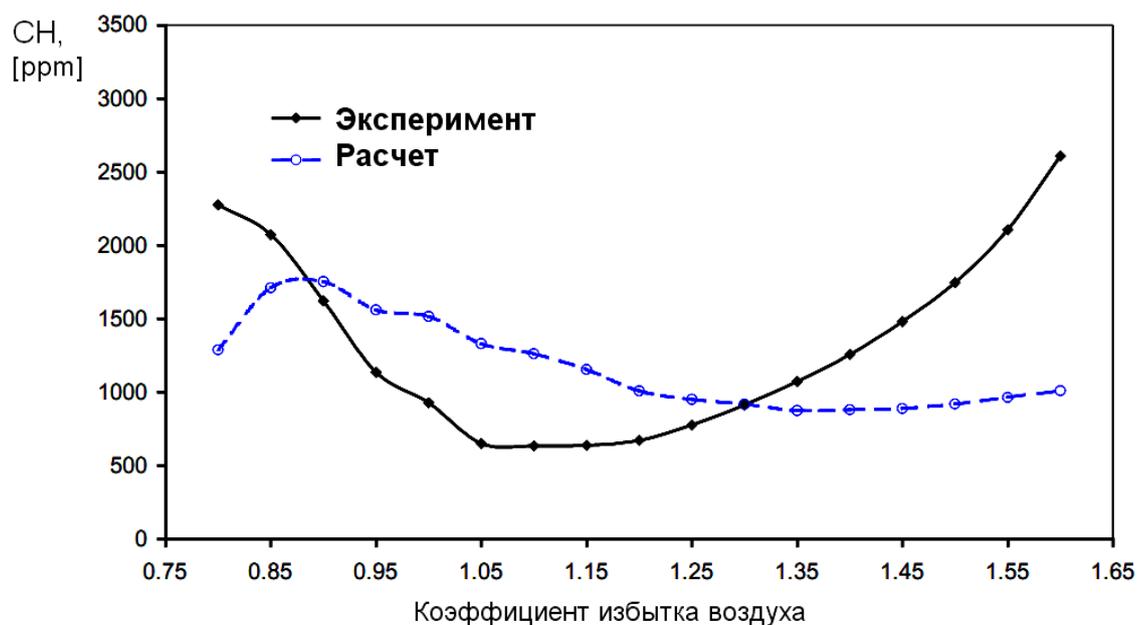


Рисунок 1.2.2 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных концентрации СН в ОГ газопоршневого ДВС.

На рис. 1.2.2. представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных по концентрации несгоревших СН в ОГ при работе газопоршневого ДВС на природном газе.

Считается, что использование природного газа в качестве топлива заметно уменьшает концентрацию несгоревших углеводородов в отработавших газах. Но даже для такого вида топлива не удаётся разработать приемлемую методику расчёта. Так, в области рабочего диапазона коэффициентов избытка воздуха 0,95-1,25 расчётная концентрация несгоревших углеводородов превышает полученные экспериментально в 2,6 раза.

Таким образом для создания адекватной методики расчёта концентрации несгоревших СН в ОГ ДВС с искровым зажиганием необходимы исследования определяющие закономерности основных характеристик распространения пламени.

### 1.3 Особенности распространения пламени и его основные параметры в двигателях внутреннего сгорания

Сгорание – это довольно сложный химический процесс с элементами физики, термодинамики и газовой динамики, включающие в себя множество комплексов между собой. В начале данных реакций лежат взаимодействия горючего и окислителя или он же кислород воздуха атмосферы. Результаты сгорания определяются простыми термохимическими уравнениями экзотермических равновесных химических реакций. Данные уравнения могут определить в теории необходимое количество воздуха для сгорания определенного количества горючего (топлива), состав продуктов сгорания (ТВС), объемы компонентов и т.д.

Но, к сожалению, данные уравнения не дают полного и подробного представления о динамических характеристиках процесса сгорания. Динамику процесса может отражать химическая кинетика. Кинетические уравнения реакций с первого по третий порядков считающиеся классическими, разработанные с учётом закона действующих масс, адекватно описывают конечную скорость для весьма ограниченного круга простейших химических реакций горения. Они применяются для реакций простейших гомогенных смесей при отсутствии сложных взаимодействий, т.е. для системы с однородным реагентом, когда температура остаётся постоянной при неизменном объеме и при исключении каталитического воздействия на стенки цилиндра и т.п. [53, 113, 117].

Химические реакции в двигателе внутреннего сгорания не могут относиться к простым химическим реакциям. Известно, что сгорание углеводородов осуществляется сложными цепными механизмами [58, 74, 93, 105, 107].

Сложные механизмы цепных химических воздействий и реакций были предложены Ю.Б. Харитонов и Н.Н. Семеновым. Основой их работ лежат представления о том, что превращение веществ изначальных (топлива и окислителя) в процессе реакций происходят множество ступеней и стадий, в

процессе которых образуются химические активные вещества, интенсивно взаимодействующие между собой, так и с начальными исходными веществами [34,64 ,120].

В первую очередь теория химических сложных реакций рассматривает простые процессы, происходящие с атомами и отдельными молекулами. Следует отметить, что данная теория формулирует лишь общие закономерности для скоростей химических реакций горения. Для решения дифференциальных уравнений, отражающих разработанные зависимости, при использовании многоатомных и многомолекулярных исходных продуктов требуется определить экспериментальным путём большой объём констант. Практически непреодолимые затруднения возникают при разработке цепных реакций горения, протекающих в КС двигателя внутреннего сгорания, где в реакции окисления исходных продуктов происходят при высоком давлении смеси в совершенно неожиданном количестве разных компонентов, образующих топливно-воздушную смесь самого различного состава. При окислении топлива в процессе сгорания в течение малого временного промежутка происходит значительное изменение давления, объема, и температуры углеводородовоздушной смеси. Для каждого промежутка времени распределение температуры в камере сгорания довольно неоднородно: проявляется в наличии существенной разницы между объёмами, занятыми продуктами сгорания и свежей ТВС. В каждом из этих объёмов температура может считаться одинаковой за счет большой турбулентности.

### **1.3.1 Основные понятия о скорости распространения пламени в тепловом поршневом двигателе**

Одним из самых важных параметров процесса сгорания является скорость распространения пламени, который во многом определяет основные

показатели эффективности двигателя и вредных выбросов (токсичности).

Во всём процессе сгорания топливно-воздушной смеси в поршневом двигателе выделено три фазы: первая (начальная) – от подачи зажигания до появления устойчивого очага сгорания; вторая – от окончания формирования устойчивого очага сгорания до достижения максимального давления (тепловыделение порядка 90%) и третья – заключительная.

Первую и вторую фазу обычно объединяют для удобства обработки результатов исследования и это объединение названо основной фазой сгорания.

За время протекания основной фазы происходит распространение пламени через всю камеру сгорания и через весь её объем.

При постоянной частоте вращения коленчатого вала, скорость распространения пламени при достаточной турбулентности, может изменяться в соответствии с изменением коэффициента избытка воздуха: при добавке химических активаторов горения в разных количествах. В результатах работ [65, 74] получено каким образом скорость распространения пламени в основной фазе сгорания можно оценить, используя явление химической ионизации, возникающей в пламени углеводородного топлива, которая, как известно из [35], хорошо показывает с какой интенсивностью проходят химические реакции сгорания во фронте пламени.

Согласно учению турбулентного горения, разработанного К.И. Щелкиным, скорость турбулентного потока может зависеть от нормальной скорости распространения пламени, что может подтвердить существенное влияние химического состава и свойств смеси на протекание процесса сгорания в «основной» фазе.

### **1.3.2. Средняя видимая скорость распространения пламени в промежутке времени основной фазы сгорания.**

Отрезок времени  $t$  от начала зажигания до появления ионного тока химионизации в цепи датчика ионизации, установленного в наиболее удалённом от свечи зажигания объёме КС позволяет определить величину видимой средней скорости распространения пламени в «основной» фазе. Понятно, что величина видимой турбулентной скорости распространения пламени может быть только больше турбулентной скорости перемещения пламени, без отсутствия средней скорости перемещения ТВС, когда пламя движется прямолинейно от свечи зажигания к датчику. В этом случае определение видимой «средней» скорости перемещения пламени сгорания определяется отношением расстояния между свечой зажигания и ионизационным датчиком на промежуток времени  $t$ .

Полученные экспериментально записи осциллограмм ионного тока после соответствующей обработки позволили получить значения необходимых промежутков времени, что позволило рассчитать величину видимой средней скорости перемещения пламени в «основной» фазе сгорания. Полученные данные находятся в хорошем соответствии с результатами исследований, представленных в [84].

Процесс сгорания ТВС в поршневом ДВС сопровождается при непрерывном изменении давления, температуры и объема. Изменение этих параметров приводит к существенному изменению скорости перемещения пламени. [40, 49]. Большое влияние на протекание процесса сгорания оказывает угол задержки зажигания (УОЗ). Увеличение УОЗ до оптимального значения приводит к увеличению скорости распространения пламени. Например, для скоростного режима 900 мин<sup>-1</sup>, коэффициенте избытка воздуха, равного 1,0, при УОЗ = 13 и 22° поворота коленчатого вала видимая средняя скорость перемещения пламени в основной фазе составила

15.87 и 16.8 м/с, а для  $\alpha = 1,3$  этот параметр уменьшился до 11 и 12 м/с, соответственно. В итоге получено возрастание видимой средней скорости перемещения пламени в пределах основной фазы на 5.5% для  $\alpha = 1$  и 8.4% для  $\alpha = 1.3$ . Полученный эффект обусловлен сгоранием основной доли топлива в процессе сжатия, когда объём КС определяется нахождением поршня вблизи верхней мёртвой точки и процесс сгорания протекает при максимальной температуре сжатия. Однако увеличение УОЗ относительно оптимального значения создаёт условия для сгорания большей части ТВС до ВМТ, то есть при большем объёме КС. В итоге получаем уменьшение видимой скорости перемещения пламени. Кроме этого получаем отрицательную работу, совершаемую газом при сгорании. Меньшая, относительно оптимального значения, величина УОЗ создаёт условия, при которых сгорание большего количества ТВС осуществляется в процессе расширения. Приводит к ухудшению эффективных, и токсичных показателей ДВС.

Обеднение смеси относительно стехиометрии приводит к более значимому влиянию на температуру в процессе сгорания в такте расширения. Нормальная скорость распространения пламени (является общепринятой фундаментальной величиной в теории горения) при обеднении топливно-воздушной смеси уменьшается. За счёт её уменьшения (нормальная скорость распространения пламени одна из двух составляющих турбулентной) происходит падение турбулентной скорости распространения пламени [6]. Отсюда следует, что для постоянного скоростного режима при обеднении ТВС основная фаза сгорания завершается в большем объёме КС. Например, для скоростного режима  $900 \text{ мин}^{-1}$ , при УОЗ=19° ПКВ и коэффициентах избытка воздуха 0.9 и 1.3 видимая средняя скорость турбулентного перемещения пламени в рамках основной фазы сгорания составила 17.16 и 10.32 м/с, соответственно.

При введении химического активатора горения, например водорода, происходит рост средней турбулентной скорости перемещения пламени. В

качестве примера рассмотрим скоростной режим работы  $900 \text{ мин}^{-1}$ , при  $\text{УОЗ} = 19^\circ$  ПКВ. Впрыск 1% водорода по массе от бензина при коэффициентах избытка воздуха 1 и 1.4 позволил получить в основной фазе среднюю турбулентную скорость перемещения пламени 17.02 и 9.36 м/с, а при впрыске 5% водорода для этих же составов смеси - 17.27 и 11.52 м/с, соответственно.

Рассмотрим каким образом был получен эффект возрастания скорости перемещения пламени. Так как сгорание углеводородовоздушных смесей протекает по цепному механизму, то поступление в химическую реакцию горения атома водорода сопровождается на выходе из реакции образованием трёх атомов водорода [5]. Введение химического регулятора горения, которым является водород, приводит к интенсификации химической кинетики горения, так как происходит значительное увеличение активных центров в реакциях горения. Кроме этого в [9] показано, что значение коэффициента избытка воздуха в зоне реакций горения не совпадает с тем, который определяет состав свежей ТВС. Отмеченный эффект обуславливается существованием различий в значениях коэффициентов молекулярной диффузии топлива, кислорода и азота воздуха. Имеющиеся различия в указанных коэффициентах объясняют, что впрыск водорода в обеднённую углеводородоздушную смесь приводит к относительному увеличению активных частиц - водорода в ТВС. В итоге происходит рост как нормальной, так и турбулентной скорости перемещения пламени в сравнении с обеднённой углеводородоздушной смесью того же коэффициента избытка воздуха. Возрастание турбулентной скорости перемещения пламени приводит к завершению процесса сгорания в более короткий промежуток времени и меньшем объёме камеры сгорания.

Таким образом, в основной фазе сгорания скорость перемещения пламени определяется составом смеси, скоростным режимом работы ДВС, углом опережения зажигания и количеством водорода, впрыскиваемого в

ТВС.

### **1.3.3 Определение видимой средней скорости распространения пламени во II фазе сгорания.**

Определение видимой средней скорости распространения пламени производилось с привлечением экспериментальных данных. В соответствии с опубликованными литературными источниками завершением первой (начальной) фазы считается выход очага пламени из объёма электродов свечи зажигания. Этим небольшим участком перемещения пламени обычно пренебрегают. При таком допущении определение видимой средней скорости распространения пламени во II фазе сводится к вычислению отношения расстояния от свечи зажигания до наиболее удаленного объёма камеры сгорания к продолжительности этой фазы:

$$U_2 = D/t_2, \quad (1.2)$$

где  $D$  - диаметр цилиндра, равный 85 мм;  $t_2$  - продолжительность второй фазы, (мс).

Увеличение скоростного режима работы двигателя приводит к возрастанию средней скорости распространения пламени за счёт роста турбулентности, пропорциональному корню квадратному от отношения частот вращения коленчатого вала. В процессе испытаний за счёт возрастания частоты вращения с 600 мин<sup>-1</sup> до 900 мин<sup>-1</sup>, произошло увеличение средней скорости распространения пламени для коэффициента избытка воздуха,  $\alpha = 1$  с 15.3 м/с до 19.4 м/с, для бедной смеси,  $\alpha = 1.3$  с 10.62 м/с до 14.16 м/с соответственно.

Впрыск водорода в количестве 5% вызвал рост средней скорости распространения пламени для этих же коэффициентов избытка воздуха с 17.1 м/с до 21.8 м/с, и с 14.8 м/с до 18.8 м/с, соответственно.

В сравнении такой же эффект, возрастание скорости пламени на 22%, может быть получен при увеличении скоростного режима с 600 до 900об/мин.

Увеличение средней скорости распространения пламени может быть достигнуто при изменении угла опережения зажигания в направлении к оптимальному значению. Например, поддерживая значение степени сжатия, равное 7, при стехиометрическом составе смеси и скоростном режиме 900об/мин увеличение УОЗ с 13° до 19° и 26° ПКВ, вызвало рост средней скорости пламени с 17.7 до 19.2 и 19.9 м/с, при обеднении смеси до  $\alpha = 1.3$  с 14.16 до 15.28 и 16,34 м/с соответственно.

Как отмечалось выше, обеднение ТВС приводит к большему влиянию на температуру в процессе сгорания в такте расширения.

При переходе работы двигателей в область коэффициентов избытка воздуха, больших единицы, необходимо учитывать, что при обеднении ТВС, начиная с  $\alpha = 0.85 - 0.9$ , происходит уменьшение нормальной скорости распространения пламени. Это приводит к замедлению процесса сгорания и смещению его завершения в область глубокого расширения. В этой области в соответствии с результатами исследования [102] происходит уменьшение пульсационной скорости среды, что влечёт за собой и уменьшение турбулентной скорости перемещения пламени [126].

При комплексной оценке влияния угла опережения зажигания и состава смеси для скоростного режима 900 об/мин получены следующие результаты: при УОЗ=19° поворота коленчатого вала(ПКВ), коэффициентов избытка воздуха  $\alpha = 0.9$  и 1.3 средняя скорость распространения пламени составила 20.85 и 15.28 м/с, при УОЗ=13° ПКВ значения скоростей определены значениями 20.24 и 14.16 м/с, соответственно. Приведенные результаты показали меньшее влияние состава смеси по сравнению с углом опережения зажигания.

Увеличение УОЗ создаёт условия для протекания процесса сгорания

ТВС при более меньшем объеме КС и при возрастании пульсационной скорости перемещения газообразной среды. В наших экспериментах получено при уменьшении УОЗ от 21° ПКВ к 19° ПКВ произошло падение средней скорости на 26%, а к УОЗ = 13° ПКВ уже 30%.

Применение газообразного активатора горения приводит к значительному увеличению скорости перемещения пламени. Впрыск водорода в количестве 5% от массы бензина вызвал рост средней скорости перемещения пламени до 20.94, 22.2 и 22.91 м/с, на режиме 900 об/мин, УОЗ 13°, 19° и 26° ПКВ,  $\alpha = 1.1$ , и для этих же режимов, но для состава смеси,  $\alpha = 1.3$  величина скоростей составила 18.64, 20.24 и 21.14 м/с, соответственно. Падение средней скорости с обеднением смеси (с  $\alpha = 1.1$  до  $\alpha = 1.3$ ) для УОЗ 13°, 19° и 26° ПКВ составило 11%, 9% и 7.7%. Этим примером подтверждается, что вблизи ВМТ, где генерируется наибольшая пульсационная скорость среды, может быть обеспечено проведение рабочего процесса с наибольшей эффективностью. вблизи ВМТ, где наибольшая турбулентность потока. При увеличении угла опережения зажигания рост нормальной скорости распространения пламени из-за изменения физико-химических свойств ТВС начинает оказывать меньшее воздействие на среднюю скорость.

### **1.3.4 Средняя скорость распространения пламени в двигателе внутреннего сгорания в III фазе горения**

Во время продолжительного горения топливно-воздушной смеси в районе ионизационного датчика, можно определить некоторые изменения скорости сгорания в III фазе. Горение в данной фазе в основном попадает под влияние небольшой турбулентности и ламинарного пламени [37, 31, 53], в этом случае характеризуется значительная зависимость от химического процесса с элементами физических свойств смеси.

Средняя скорость пламени  $U_3$  в III фазе сгорания при полном горении смеси рядом с датчиком ионизации можно определить как:

$$U_3 = l/t, \quad (1.3)$$

где  $l$  - определяющий размер в полости датчика ионизации, в нашем случае он равен 3,6 мм;  $t$  – время протекания реакций горения в полости ионизационного датчика

В топливно-воздушных смесях, близких по составу к стехиометрическим значениям, сгорание в III фазе может протекать при небольшой турбулентности. Если же обеднить смесь до  $\alpha$  более 1.2, то процесс горения существенно может сместиться в зону процесса расширения, где пульсационная скорость стремится к нулю и сгорание протекает по принципу ламинарного пламени.

С возрастанием частоты вращения коленчатого вала происходит рост продолжительности основной фазы по углу поворота КВ, смещая тем самым протекание III фазы в область больших объемов КС, при небольшом давлении, что немного снижает скорость распространения пламени в III фазе.

С возрастанием угла опережения зажигания скорость пламени в III фазе увеличивается, так как сгорание в III фазе проходит около верхней мертвой точки при небольшом объеме и при большой турбулентности, отсюда следует, что возрастает температура и давление.

При обеднении смеси от  $\alpha = 0,86 - 0,96$  скорость пламени в III фазе уменьшается - это связано с зависимостью ламинарной (нормальной) скоростью распространения пламени от коэффициента избытка воздуха, при возрастании которого скорость падает. Практическое отсутствие пульсационной скорости заряда снижает до нуля турбулентную составляющую и прекращает влиять на скорость распространения пламени в III фазе, в связи со значительным увеличением объема КС при работе на обедненных смесях, где турбулентности нет.

При добавке водорода увеличивается концентрация активных радикалов во фронте пламени, которые моментально диффундируют в несгоревшую топливную смесь, что позволяет скорости пламени быть очень быстрой, не смотря на небольшую турбулентность.

#### 1.4 Ширина зоны турбулентного горения

Газ или жидкость могут быть как в турбулентном движении, так и в ламинарном.

Ламинарное движение – это постоянное упорядоченное движение, когда основная масса движется по стационарным путям. Ламинарный поток в каждой точке движения не меняется в любом времени – он постоянный.

Турбулентное движение характеризуется хаотичным, беспорядочным движением целой массы молей среды, которые переходят очень быстро из одного слоя в другой.

Для появления турбулентного движения необходимо, чтобы сила вязкости была намного меньше, чем сила инерции. Соотношение данных сил можно определить критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (1.4)$$

где  $U$  – скорость потока среды;

$d$  – определяющий (эквивалентный линейный размер потока;

$\nu$  – кинематическая вязкость потока среды.

Турбулентность возникает в том случае, если

$$Re_{\text{турб}} \geq Re_{\text{кр}} \approx 2000 \quad (1.5)$$

и диффузию турбулентного потока можно найти через вторую производную от градиента скорости:

$$D_{\text{турб}} = \chi_{\text{турб}} = \nu_{\text{турб}} = d^2 \frac{dU}{dy} \quad (1.6)$$

Силу вязкости можно будет определить второй производной от

градиента скорости и плотности потока:

$$F = \rho d^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2 \quad (1.7)$$

где  $F$  – сила вязкости теплового потока;

$\rho$  – плотность потока.

Можно так же представить перенос вещества такой функцией, которая будет зависеть от его свойства, концентрации и времени:

$$M = 4\pi r^2 D \frac{dc}{dr} \quad (1.8)$$

где  $M$  – масса вещества;

$D$  – коэффициент диффузии;

$C$  – концентрация диффундируемого вещества;

$r$  – радиус потока.

В потоке турбулентности формула будет выглядеть следующим образом:

$$U_{гор} = const \sqrt{Wd} \quad (1.9)$$

где  $W$  – объемный расход потока вещества в единицу времени;

$d$  – линейный размер потока.

Константа, которая входит в это выражение, зависит от скорости химической реакции в пламени.

Ширина зоны пламени в турбулентном потоке определяется как

$$\delta_{гор} = U_{гор} * t_{гор} \quad (1.10)$$

где  $U_{гор}$  – скорость распространения пламени, которая зависит от коэффициента температуропроводности, зоны сгорания и размера объема горения;

$t_{гор}$  – время горения

Когда ширина зоны горения большая, соответственное и объем увеличивается, где происходит химическая реакция, поэтому сгорает

большое количество топлива.

Ширина зоны уменьшается тогда, когда при постоянной теплопроводности скорость перемещения пламени будет изменяться из-за скорости химической реакции.

Таким образом, можно сделать выводы:

Основные характеристики параметров сгорания топливно-воздушной смеси (ТВС), включающие турбулентную и нормальную скорость перемещения пламени и ширину зоны турбулентного горения (ЗТГ) – могут определить токсичные выбросы [2] и эффективность работы теплового поршневого двигателя, включая с искровым зажиганием [3].

Так как скорости перемещения пламени в потоке исследованы довольно подробно как практически, так и в теории, то для условий двигателей внутреннего сгорания (ДВС) эти характеристики всё еще остаются спорными. Помимо этого, ширина зоны горения в КС ДВС исследована не достаточно подробно. В 50–60 гг. прошлого века, известный в своих кругах академик Б.С. Стечкин заметил важную значимость данного параметра горения для рабочего процесса двигателя [4]. Так же над этим вопросом работали небезызвестные труды А.В. Талантова про горение в потоке [5] и Н.В. Иноземцева про горение в поршневом двигателе с искровым зажиганием [6]. В данный момент экспериментами, исследованиями и расчетами ширины зоны горения в ДВС занимаются крупные исследовательские компании и организации. Обычно для экспериментов используются лазерные методы. Предпоследние результаты исследований [7; 8] показывали, что в современных двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием могут быть описаны микроламинарным пламенем [9]. Это значит, что определенная область КС может быть заполнена существенно искривленным и разорванным фронтом пламени. Такая зона фронта пламени может изменяться в своих размерах и перемещаться по КС до конца процесса сгорания, до момента соприкосновения пламени со стенками цилиндра. В теории рассматриваются

три вида структуры зоны турбулентного горения, представленные Р. Борги и В. Дестраем [11]: тонкое искривленное пламя, «уплотненное искривленное пламя» и «плотное» пламя. Совместный метод исследования ученых предложенных выше структур зон турбулентного сгорания, состоит в выделении и последующем определении толщины турбулентного пламени как расстояния между огибающими кривую постоянной температуры свежей ТВС перед зоной горения и кривую температуры горения линиями. Зона подогрева для структуры тонкого искривлённого пламени определяется аналогично случаю распространения ламинарного пламени. В структуре «уплотненного» пламени зоны подогрева и зоны протекания химических реакций горения имеют заметные размеры. В связи с этим в этой структуре выделены их осредненные зоны. Границей, разделяющей эти осредненные зоны, является линия огибающая кривую местоположения температуры горения со стороны зоны подогрева линия.

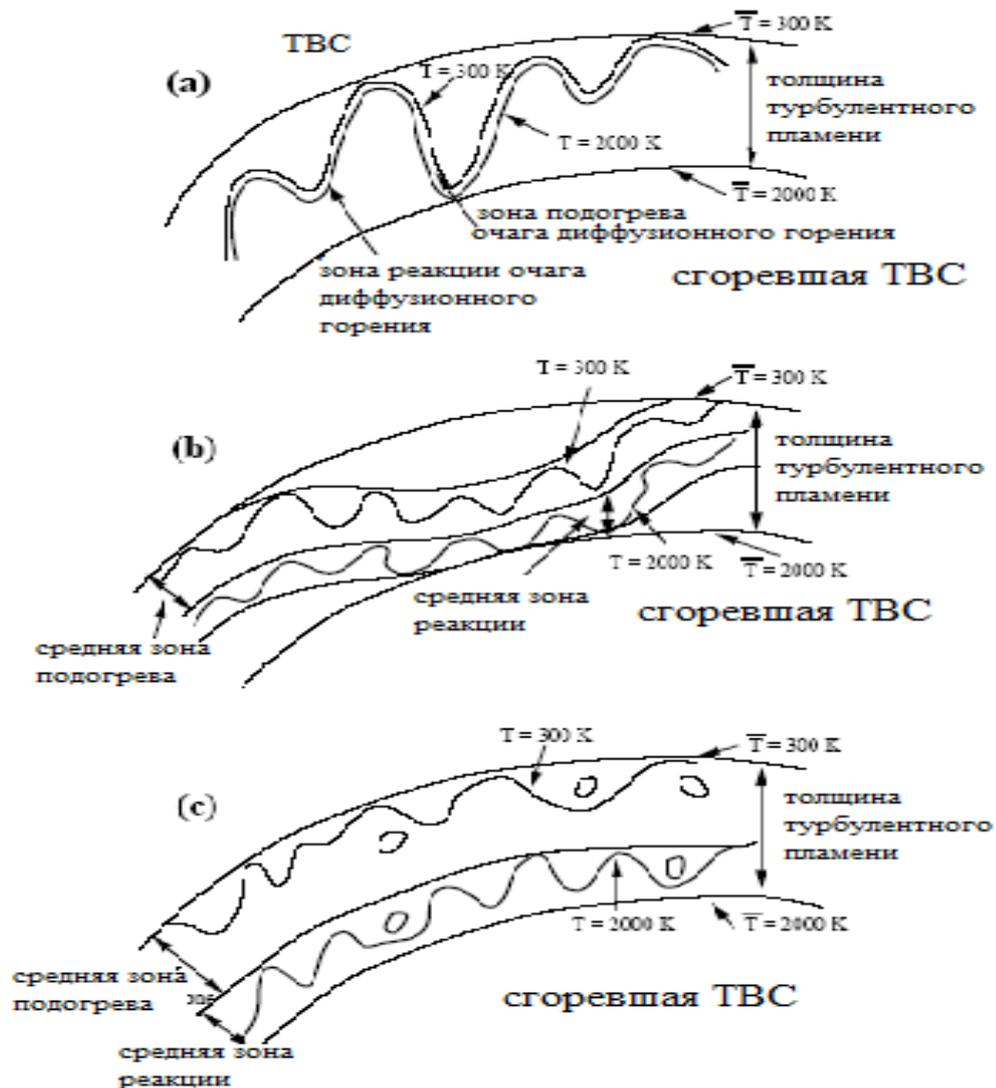


Рисунок 1.4.1 - Структуры зон турбулентного горения по Р. Борги и В. Дестрио

(а) тонкое искривленное пламя - Критерий Дамкёллера:  $D_a = t_t / t_c \gg 1$ ,  $t_t$  – время существования турбулентных молей,  $t_c$  – время протекания химических реакций. Критерий Карловитца  $K_a = t_c / t_k$ ,  $t_k$  – время существования молей масштаба Колмогорова. После преобразования  $K_a = (\delta_l / l_k)^2$   $K_a < 1$ :  $U' / S_e < 1$  – «сморщенное пламя»,  $U' / S_e > 1$  – сморщенное пламя с очагами ТВС в зоне горения.

(б) «уплотненное искривленное пламя» -  $1 < K_a \leq 100$  «утолщенное» сморщенное пламя или тонкая реакционная зона реакций горения.

(с) «плотное» пламя -  $K_a > 100$  Режим «утолщенного» пламени или хорошо перемещенного реактора, в котором под воздействием интенсивных турбулентных пульсаций зоны подогрева и зоны химических реакций существенно перемешаны. Структуру ламинарного пламени практически невозможно выделить.

### **1.5 Влияние конструкции камер сгорания на характеристики течения и турбулентности ТВС в двигателе**

Все поршневые двигатели внутреннего сгорания имеют ряд конструктивных особенностей, обуславливающих характеристики течения и турбулентности и, отсюда следует, их КПД и токсичность. Как следует из второго начала термодинамики, ни одна тепловая машина не может иметь КПД равный 100% и полноту сгорания хотя бы 99%.

Рассматривались 10 видов конструкций разных камер сгораний [6, 7, 8] рис. 1.5.1: плоская, цилиндрическая, квадратная, крестообразная, небула, полусферическая, турбинная – все со степенью сжатия 12; конусообразная, имеющая степень сжатия, равную 14-и и квадратная и полусферическая с наиболее высокой степенью сжатия, равной 16-и.

Был проведен комплекс испытаний, в которых были определены основные характеристики работы ДВС с использованием перечисленных КС. Исследовалась турбулентность, средние скорости движения газообразного рабочего тела, а также скорость тепловыделения в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Испытания были проведены на одноцилиндровом двигателе, изготовленного как часть 6-и цилиндрового двигателя VolvoTD – 102 (основные параметры которого - диаметр цилиндра 120,6мм, ход поршня 140мм).

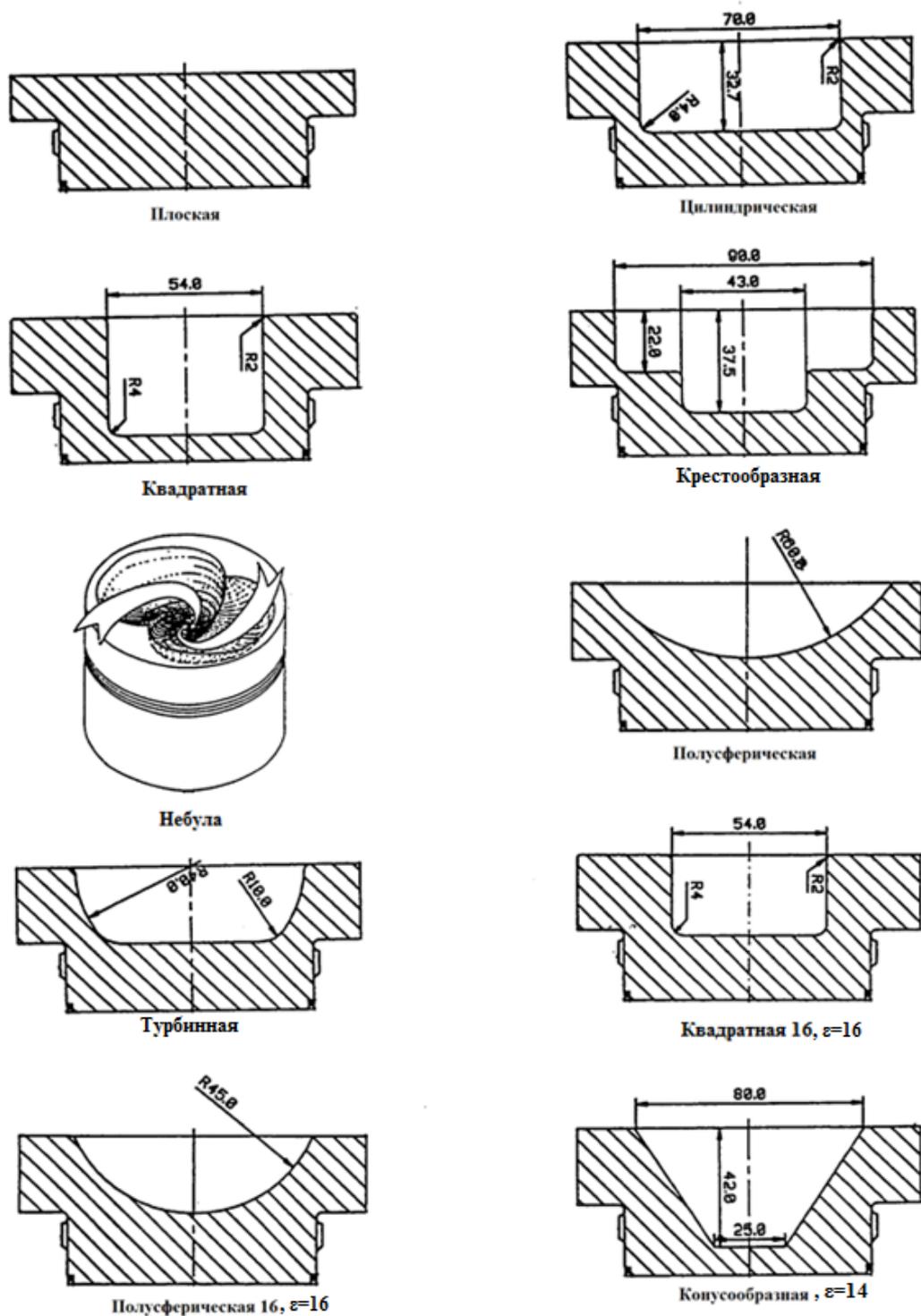


Рисунок 1.5.1 –Геометрическая форма исследуемых камер сгорания.

Изготовленная установка спроектирована и изготовлена как ДВС с искровым зажиганием. Испытания проведены при использовании скоростного режима 1200об/мин и составе топливно-воздушной смеси  $\alpha (\lambda) = 1,5$ .

На рис. 1.5.2 представлена схема координат, по которым определялись как средние скорости перемещения, так и скорость турбулентных пульсаций в горизонтальной плоскости.

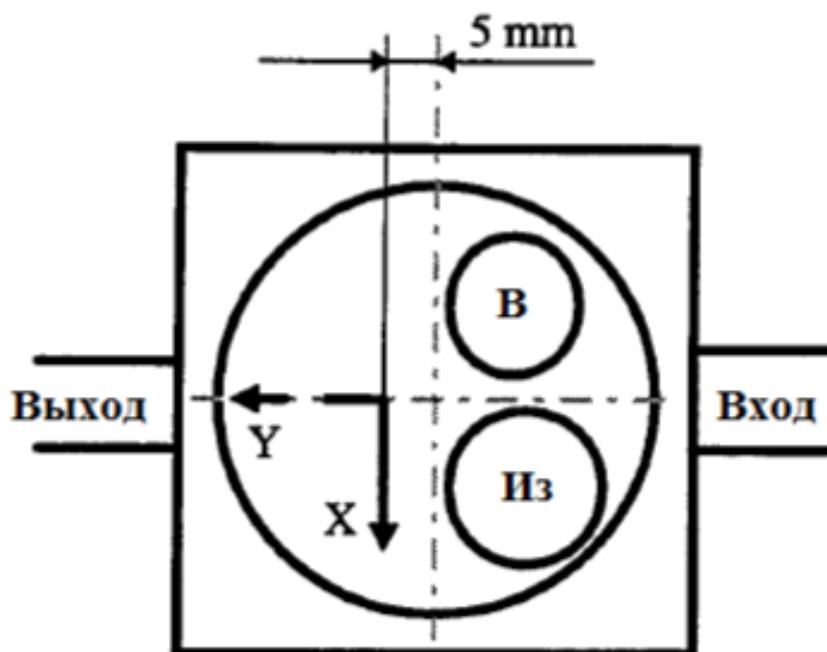


Рис.1.5.2 – Схема головки цилиндра установки с координатами измерения параметров средней и пульсационной скорости.

Вихревое движение направлено по часовой стрелке.

Измерялись пульсационные скорости заряда ТВС по осям  $x$  и  $y$ . По этим же осям проводилось измерение средней скорости перемещения ТВС в цилиндре.

На рис. 1.5.3 представлены результаты экспериментального исследования по определению динамики изменения средней скорости перемещения, турбулентности заряда ТВС и скорости тепловыделения в зависимости от угла поворота коленчатого вала (КВ) относительно положения ВМТ.

На рис. 1.5.4 Представлены аналогичные результаты исследования для части камер сгорания с повышенной степенью сжатия.

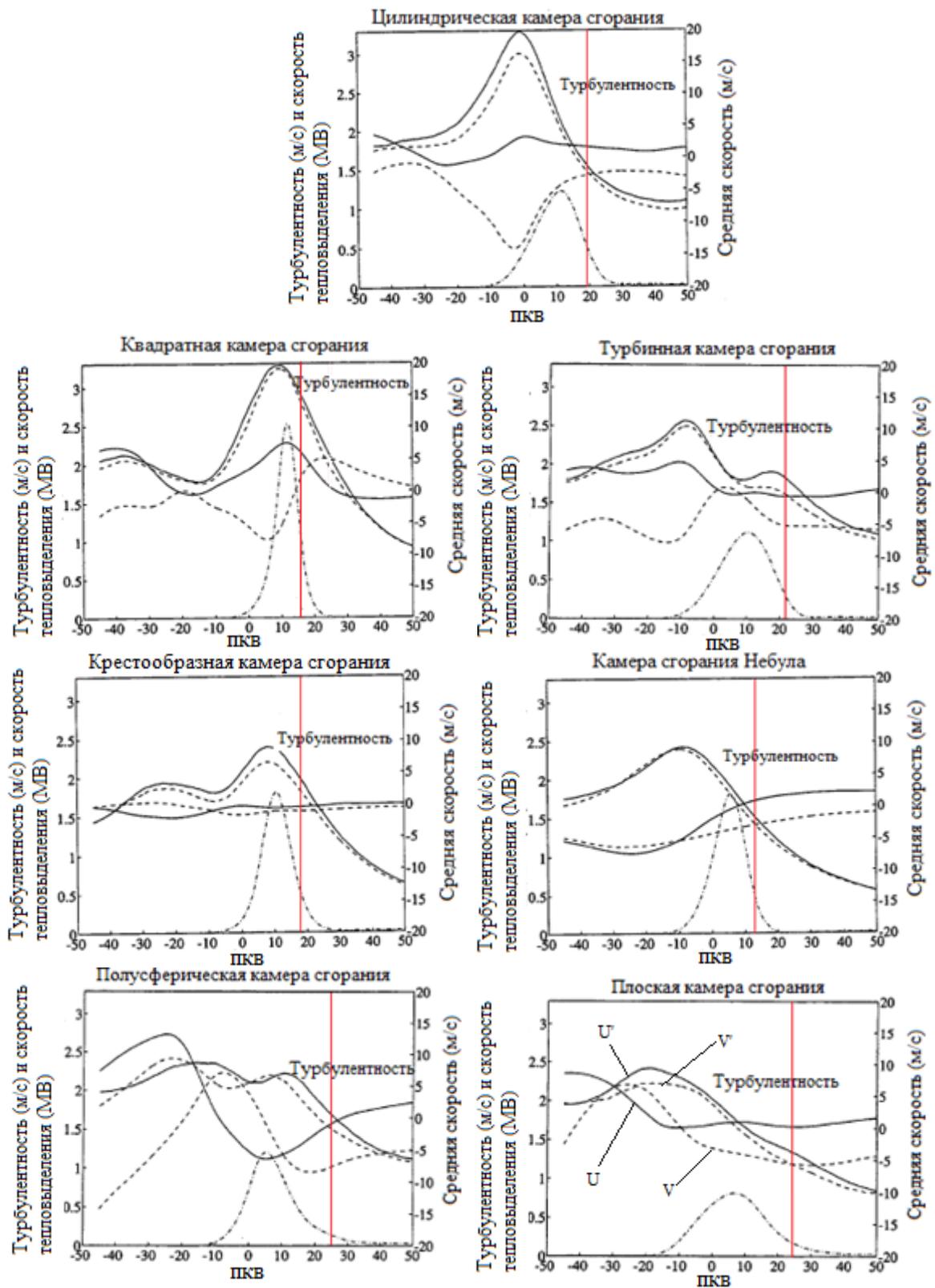


Рисунок 1.5.3 – Зависимости составляющих средней скорости, скорости турбулентных пульсаций и скорость тепловыделения в зависимости от угла поворота коленчатого вала; степень сжатия равна 12

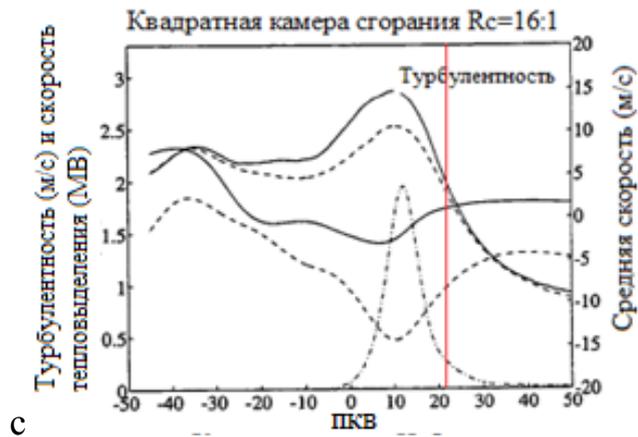
Результаты рассматриваемых экспериментов, рис. 1.5.3 показали, что

изменение характеристик перемещения топливно-воздушной смеси и продуктов сгорания при изменении различных конструкций камер сгорания изменяются в широком диапазоне относительно положения верхней мёртвой точки положения поршня. Особенно это относится к пульсационным скоростям. Максимальные значения пульсационной скорости достигаются перед достижением максимума скорости тепловыделения. Причём наиболее высокие уровни пульсационной скорости получены в конструкциях камер сгорания, обладающими наивысшими газодинамическими сопротивлениями. Уровень полученных газодинамических потерь, как показали дальнейшие исследования, несмотря на увеличение скорости распространения пламени, привёл к снижению индикаторного коэффициента полезного действия.

Вследствие того, что выбросы несгоревших углеводородов определяются характеристиками химических реакций горения в завершающей фазе сгорания у стенок камеры сгорания, необходимо рассмотреть параметры перемещения топливно-воздушной смеси при достижении 90 процентов тепловыделения. Для всех исследованных конструкций камер сгорания пульсационные скорости имеют приблизительно одинаковую величину, порядка 2 м/сек.

Следовательно, повлиять на характеристики распространения пламени в завершающей фазе сгорания и, благодаря этому обеспечить снижение выбросов непрореагировавших углеводородов в отработавших газы практически невозможно.

Проведём анализ в какой степени на характеристики перемещения топливно-воздушной смеси оказывает влияние степень повышения давления. Результаты представлены на рис. 1.5.4, для трёх конструкций камер сгорания, для которых при степени сжатия 12 получены наибольшие и наименьшие значения пульсационных скоростей. Максимальный уровень пульсационных скоростей не вырос, а для квадратной камеры сгорания даже уменьшился по сравнению с меньшей величиной степени сжатия.



С

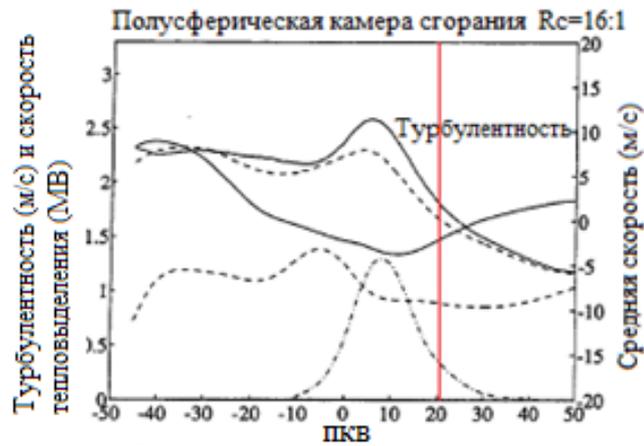


Рисунок 1.5.4 – Изменение составляющих средней и пульсационной скорости, скорости тепловыделения в зависимости от угла поворота коленчатого вала в камерах сгорания с повышенной степенью сжатия

Красной линией выделен угол поворота коленчатого вала, соответствующий достижению тепловыделением 90% от располагаемого

Что касается величины пульсационных скоростей в диапазоне работы двигателя при достижении 90% тепловыделения, уровень этих скоростей

даже несколько понизился.

Из анализа рассмотренных результатов исследования вытекают следующие формулировки выводов:

1. Скорость турбулентных пульсаций в горизонтальной плоскости (в плоскости перпендикулярной оси цилиндра) камеры сгорания практически для всех конструкций исследованных камер сгорания соответствует изотропному характеру или мало отличается от него.

2. Положение пика составляющих скорости турбулентных пульсаций или совпадает с положением пика тепловыделения (для квадратной, крестообразной, полусферической КС), или располагается перед появлением тепловыделения (характерно для небулы, цилиндрической, конической, турбинной и плоской КС).

3. При увеличении степени сжатия происходит некоторое снижение максимальной скорости составляющих пульсаций; характерно для квадратной формы КС и некоторому росту в конструкции полусферической КС.

4. Рассматривая диапазон рабочего хода по углу поворота коленчатого вала, в котором реализуется 10 – 90% тепловыделения от располагаемого значения, отмечено, что средняя скорость турбулентных пульсаций, определяемая конструкцией камеры сгорания может изменяться в широком диапазоне от 1,7 (в плоской КС) до 3,2 (в квадратной КС) м/сек. Полученные результаты показывают реальную перспективу разработки конструкций камер сгорания, в которых управление турбулентной скоростью распространения пламени осуществляется при изменении турбулентной составляющей (пульсационной скорости).

5. При достижении 90% тепловыделения пульсационные скорости для всех исследованных конструкций камер сгорания имеют приблизительно одинаковые значения, порядка 2 м/сек.

Анализ результатов исследования влияния конструкции камер сгорания на характеристики перемещения топливно-воздушной смеси показывает, что

снижение концентрации несгоревших углеводородов изменением конструкции камеры сгорания практически не может быть обеспечено.

Из обсуждённого обзора литературных источников вытекает заключение, что скорость и ширина (толщина) пламени относятся к тем характеристикам перемещения пламени, которые оказывают определяющее влияние на организацию протекания рабочего процесса и характеризуют количество вредных выбросов. В свою очередь характеристики рабочего процесса и токсичных выбросов во многом зависят от вида топлива, скоростного режима работы двигателя и, несомненно, химии процесса горения при совершении физических и термодинамических процессов при взаимодействии топлива с кислородом воздуха. При рассмотрении механизма сгорания ТВС в поршневом ДВС оказалось, что в современных теоретических методах при определении скорости перемещения и ширины фронта пламени отсутствует оценка наиболее значимых для них параметров. Как известно решение подобных задач требует расходования большого объёма трудовых и материальных ресурсов, поскольку предварительно необходимо создать обширный банк данных для описания динамики тепло- и массопереноса, температурных полей и составов смеси во всем объеме КС. Рассмотренные требования невозможно удовлетворить без проведения большого объёма экспериментальных исследований, в которых в зависимости от обсуждённых выше параметров следует произвести определение скорости перемещения и ширины зоны турбулентного горения (фронта пламени).

Одним из самых эффективных методов повышения полноты сгорания можно назвать катализатор. Ученые предложили вставить в головку цилиндра пористый катализатор с функцией окисления топлива. Плюс данного прибора состоит в том, что его поверхность развита и содержит определенную структуру с активными центрами. Минус данного катализатора заключается в создании ощутимого аэродинамического сопротивления, что осложняет смешивание топлива с вихревыми потоками

горении, а так же, повышает шансы на потери при трение и продувке цилиндра в движущейся газовой среде. Но главный недостаток такого катализатора является очень быстрая потеря его активности, поскольку, пористый материал имеет свойство небольшой теплопроводности и существенно разогревается в слоях, прилегающих к области сгорания топливной смеси. Это вызывает быстрый выход из строя катализатора и его моментальное сгорание и снижение качества пористой поверхности, как следствие, снижение его эффективности. Так же засорение поверхности катализатора сажей играют свою негативную роль.

Так же можно изменить конструктивно КС [26]. Конструкция камеры сгорания вызывает наибольшие трудности при её проектировании и изготовлении. Эти трудности обуславливаются необходимостью обеспечения следующих требований:

- 1 Самое главное, вытекающие из её названия, обеспечение высокой полноты сгорания,  $\eta_{сг}$ , который определяется отношением количества сгоревшего топлива к массе, поданного. Причём полнота сгорания должна оцениваться при завершении такта расширения, в конце такта выпуска. Эти данные необходимы для оценки количества топлива, которое при сгорании приносит полезную работу в такте расширения и отрицательную работу в такте выпуска. В идеале необходимо получить полноту сгорания в 100%. В действительности для ДВС с искровым зажиганием в такте расширения полнота сгорания составляет порядка 90% и в конце такта выпуска приблизительно 94-95%.

- 2 Небольшие размеры камеры сгорания для того чтобы облегчить вес двигателя.

- 3 Устойчивое протекание процесса сгорания в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха, скоростного режима, состояния атмосферы. Надёжный запуск при изменении температуры окружающей среды

4 Малая дымность и загазованность вредных выбросов (для меньшего загрязнения окружающей среды).

5 Уменьшение концентрации токсических веществ в выхлопных газах для удовлетворения норм ЕЭК ООН — одно из наиболее важных требований. Наиболее существенными концентрациями веществ в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания являются: оксид углерода, CO, несгоревшие углеводороды,  $C_nH_m$  и оксиды азота,  $NO_x$ .

6 Отсутствие автоколебаний, вибрации и детонации.

Эффективность работы КС определяется большим количеством характеристик. Наиболее важными из них являются характеристики по полноте сгорания топлива, так как от них зависит экономичность расхода топлива, выбросы загрязняющих вредных для здоровья человека веществ (CO и CH) долговечность и работоспособность двигателя. Очень много работ произведено на момент рассмотрения разных типов и видов камер сгораний. Но к сожалению не до конца изучены все условия работы камер сгораний двигателей, которые отличаются по конструкциям и особенностям.

**Как бы то ни было, конструктивно повысить полноту сгорания выше 90% очень и очень сложно, как это показано на рис. 1.5.3-1.5.4.**

В этом случае надо воздействовать на процесс сгорания ТВС применением активаторов горения – водородом. Ведь известно, что даже незначительные добавки водорода в топливную смесь могут привести к существенно большему, чем простое замещение, увеличению выделившейся при сгорании теплоты, то есть водород будет являться химическим активатором горения. Очень много внимания уделялось топливу с добавкой водорода в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Живой интерес к таким добавкам можно объяснить хорошими моторными свойствами водорода, в частности, хорошей теплотворной способностью, широкими концентрационными пределами горения, высокой диффузионной способностью, устойчивостью воспламенения и горения. Можно отметить, что в данный момент водород можно рассматривать как наиболее вероятное

перспективное топливо для ДВС. Результаты проведенных многочисленных исследований показали, что использование водорода в различных типах двигателей внутреннего сгорания и в первую очередь поршневых, как наиболее распространенных, позволяет существенно увеличить их КПД и снизить вредные выбросы токсичных газов, которые в свою очередь существенно влияют на окружающую среду, т.к. в составе обязательно содержатся СО - оксид углерода и СН - продукты неполного окисления и разложения углеводородного топлива, а окислы азота (NOx) могут быть значительно снижены путём обеднения топливовоздушной смеси [2, 3].

Однако водород не так распространен как хотелось бы в ДВС. Причина в его дорогостоящем добывании. Так же использования данной добавки, приводит к конструктивным изменениям двигателя, в особенности к увеличению объема двигателя.

Но исследования с использованием водорода в ТВС сейчас очень активно проводятся. Было установлено, что даже при небольшой подаче водорода в ТВС происходит улучшение всех показателей ДВС и появляется возможность существенно обеднить топливную смесь [2, 4].

Среди химических активаторов горения в первую очередь рассматриваются их влияние на эффективность работы энергетических установок и токсичность отработавших газов по сравнению с широко применяемыми видами топлива, такими как: бензин и дизельное топливо.

## **Водород**

В качестве химического активатора горения углеводородных топлив наиболее широко известен водород, который качественно выделяется от обычных углеводородных топлив такими важнейшими физико-химическими параметрами сгорания как: энергией воспламенения, концентрационными пределами воспламенения и горения и, в особенности, нормальной скоростью распространения пламени.

Выявление особенностей применения водорода в организации

процесса сгорания топлив в поршневых тепловых двигателях и установках представляет большой научный и практический интерес. Максимальная нормальная скорость распространения пламени водородовоздушной смеси при прочих равных условиях больше, чем в бензовоздушной почти в семь раз. Концентрационные пределы сгорания водорода в воздухе, коэффициент избытка воздуха изменяется от 0,15 до 10, позволяет переходить к качественному регулированию процессов сжигания топлива в камерах сгорания двигателей и установок.

Важнейшим показателем организации процесса сгорания ТВС является энергия воспламенения. Для осуществления воспламенения водорода она наиболее минимальна, так как задержка воспламенения водородовоздушной смеси практически не зависит от температуры и давления смеси.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что добавление небольшого количества газообразного водорода повышает КПД двигателя и значительно снижает токсичные выбросы ОГ, особенно, при использовании бедной топливно-воздушной смеси. Устойчивый процесс горения, а значит надёжная работа энергетической установки, при обеднении смеси с добавкой водорода обеспечивается увеличением скорости распространения пламени до величин, близким к соответствующим на стехиометрических смесях. Необходимо отметить существенное расширение пределов устойчивого обеднения смеси. Экспериментально показано, что добавка водорода в количестве 5-6% от расхода топлива обеспечивает устойчивую и стабильную работу двигателя при использовании топливно-воздушных смесей при коэффициентах избытка воздуха, превышающих 1,4.

### **Перекись водорода**

Кроме водорода активирующее действие на горение углеводородных топлив могут оказывать и другие добавки. Среди них можно рассматривать перекись водорода, которая легко разлагается по реакции



где Q – тепловой эффект реакции. Из приведенной формулы видно, что кроме тепла в результате реакции выделяется молекулярный кислород, способный активно дожигать неполные продукты сгорания до конечных. Вода же при определенных условиях может разлагаться на радикалы О и ОН, являющимися активными центрами горения.

### **Ацетилен**

Активирующее воздействие на горение углеводородов предположительно может оказывать и ацетилен. Это предположение обосновывается достаточно широкими концентрационными пределами горения ацетилена, высокой температурой сгорания и скоростью распространения фронта пламени, что определяет устойчивость процесса горения.

### **Закись азота**

Аналогичными свойствами обладает и закись азота, отличительным свойством которой, в отличие от озона и в какой-то мере перекиси водорода, устойчивость в свободном состоянии, т.е. способность к длительному хранению.

### **Отходы производства химической продукции**

Гептановые и спиртосодержащие фракции могут являться химическими активаторами горения, промоторами, из-за присутствия в их составе гидроксильной группы ОН, которая в соответствии с химической кинетикой горения способствует ускорению завершения процесса сгорания.

Из рассмотренных активаторов горения наиболее предпочтительным является водород.

### **Выводы к главе 1**

Обзор литературных источников смог показать следующее:

1. Конструктивные мероприятия изменения камер сгорания не позволяют обеспечить полноту сгорания ТВС в процессе расширения рабочего тела выше 90%.

2. Турбулентность ТВС в заключительной (третьей) фазе сгорания для всех камер сгорания остаётся приблизительно одинаковой, порядка 1,5-2,0 м/сек.

3. Отсюда следует изменение конструкции камер сгорания не обеспечивает увеличение турбулентной составляющей, пульсационной, что не позволит изменить в направлении увеличения скорость сгорания и не обеспечит интенсификацию протекания химических реакций горения вблизи стенок камеры сгорания, где находится основная часть несгоревших углеводородов

4. Таким образом наиболее эффективным методом снижения НСН в ОГ представляется направление увеличения нормальной составляющей турбулентной скорости распространения пламени, например за счёт добавки водорода в ТВС.

5. Нет удовлетворительных расчётных методов определения НСН.

6. Нет удовлетворительных расчётных методов и экспериментальных данных определения ЗТГ.

Рассмотренные выше результаты исследований позволяют сформулировать следующие задачи исследования:

1. Определить взаимосвязь ширины ЗТГ с максимальным давлением сгорания и временем его достижения, которые в процессе проектирования и доводке могут быть определены по методике И.И. Вибе.

2. Разработать параметр, обобщающий связь концентрации несгоревших углеводородов с максимальным давлением сгорания.

3. Разработать эмпирическую формулу для расчётного определения концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах.

## **Глава 2 Экспериментальное оборудование и методики проведения испытаний**

Так как диссертационная работа выполнена с использованием экспериментальных данных П.И. Ивашина, М.П. Рамазанова, А.Д. Дерячева и А.Я. Твердохлебова [2, 3, 56, 78, 81] рассмотрим экспериментальное оборудование и методики проведения испытаний в их работах.

Выполнение исследований в рамках сформулированной цели проводилось на оборудовании специализированной экспериментальной базы, созданной для изучения характеристик распространения пламени в камере переменного объёма и их связи с эффективностью работы ДВС и его токсичных показателей.

Более подробный процесс изучения работы двигателя и процесс сгорания, как правило, проводят на одноцилиндровых установках, а так же на тех установках, где процесс сгорания состоит на одиночных циклах. На таких установках предоставляется возможность контролирования и изменения параметров рабочего режима двигателя (давления, температуры сжатия, температуры стенок, коэффициента избытка воздуха) при постоянстве всех остальных параметров.

### **2.1. Экспериментальное оборудование**

Исследования характеристик процесса распространения пламени (скорости, электропроводности, обусловленной хемионизацией и ширины зоны горения) и закономерностей, связывающих эти характеристики с вредными выделениями в отработавших газах, проводились при использовании специальной установки УИТ-85 [189] (рисунок 2.1.1). Конструкция установки по основным параметрам соответствует конструкции автомобильного ДВС. В то же время она отвечает требованиям, позволяющим достаточно глубоко проводить исследования процесса

сгорания в условиях, приближенных к существующим в поршневых двигателях.

УИТ-85 смоделирована с одноцилиндрового четырехтактного двигателя с внешним смесеобразованием с конструктивными параметрами – диаметр цилиндра 85 мм и отношением хода поршня к диаметру цилиндра  $S/D = 1.35$ . Одним из главных достоинств этой установки заключается в возможности изменять степень сжатия. Привод коленчатого вала (КВ) осуществляется электромотором, чем обеспечивается поддержание частоты вращения КВ постоянным при изменении различных исследуемых параметров. Установка позволяет проводить исследования на двухрежимах вращения коленчатого вала: 600 и 900  $\text{мин}^{-1}$  (об/мин). Приготовление топливно-воздушной смеси производится либо с использованием простого одножиклёрного карбюратора, либо при впрыске топлива через форсунку во впускной канал. Для обеспечения гомогенности горючей смеси в конструкции установки установлен подогреваемый впускной трубопровод. Для воспроизводимости результатов испытаний необходимо было поддерживать постоянными во впускной системы как влажность воздуха, так и температуру. Таким образом конструкция обеспечивает максимальную однородность ТВС при переходе от цикла к следующему циклу, что приводит к значительному снижению межцикловой нестабильности (МЦН) работы установки, одно из требований, необходимых для соблюдения при исследовании процесса распространения пламени.

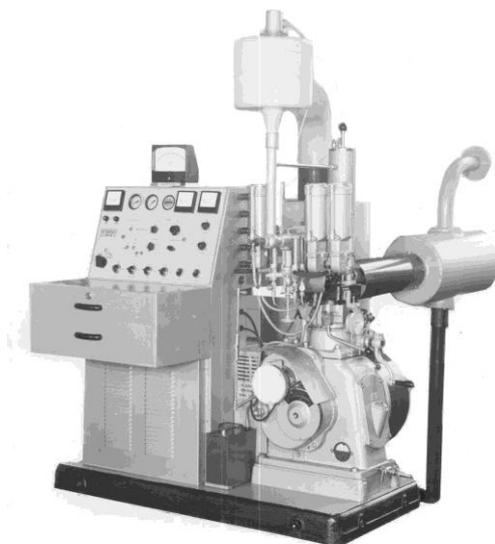


Рисунок 2.1.1 –Установи УИТ-85

В головке камеры сгорания установки выполнено резьбовое гнездо, в которое могут устанавливаться ионизационные датчики различных конструкций. При этом конструкция камеры сгорания установки не изменяется. Конструкция используемой установки обеспечивает контроль основных режимных параметров при проведении различных исследований, а именно: температуру охлаждающей жидкости, степень сжатия, частоту вращения КВ, состав смеси, угол опережения зажигания и поочерёдное их изменение. При этом для исследуемых параметров, независимо друг от друга, определяются зависимость того или иного фактора на процессы распространения пламени и вредные выделения в ОГ. Всё это подтверждает возможность установки воспроизведения с высокой точностью режимов испытаний – является важным условием при исследовании процессов сгорания. Анализ опубликованных результатов исследований характеристик распространения пламени в камерах сгорания ДВС, в которых использовались ионизационные датчики различных конструкций, позволил обосновать использование установки УИТ-85 для моделирования процессов, реализующихся в автомобильных двигателях и поршневых установках.

. Схема экспериментальной установки, используемой при проведении испытаний, показана на рисунке 2.1.2.

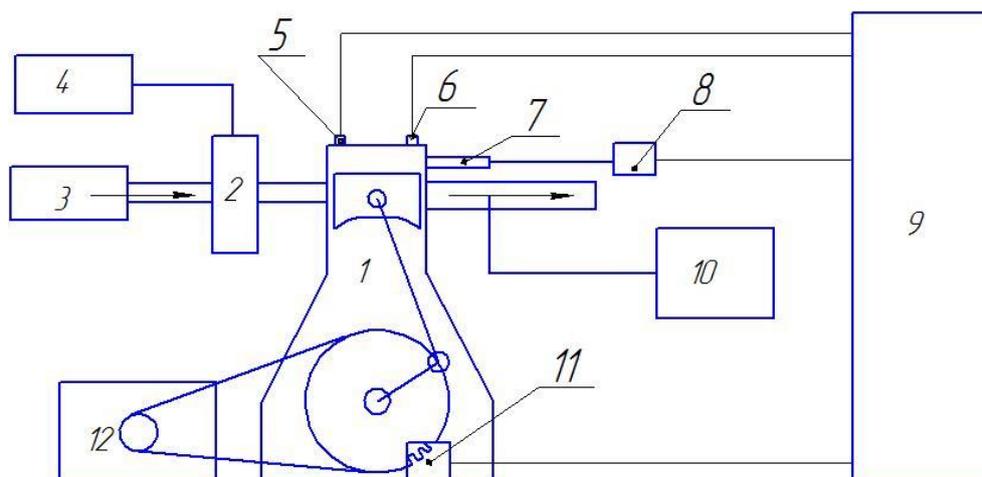


Рисунок 2.1.2 – Схема экспериментальной установки:

1 - УИТ-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 – электромотор привода коленчатого вала

Основной узел экспериментального стенда - одноцилиндровая моторная установка УИТ-85 (поз. 1). Установка содержит одноцилиндровый четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием и искровым зажиганием, электрическим приводом к коленчатому валу (поз. 12) от асинхронного двухскоростного электромотора переменного тока. Электромотор выполняет функции запуска и поддерживает постоянную частоту вращения коленчатого вала. В качестве исследовательского оборудования имеется пульт управления, контрольно-измерительная аппаратура и вспомогательное оборудование.

## 2.2 Описание методики проведения эксперимента

Все опыты проводились в лабораториях при кафедре «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного института П. В. Ивашиным, М. П. Рамазановым, А. Д. Дерячевым и А. Я. Твердохлебовым.

Для досконального изучения процесса горения в камере сгорания одноцилиндровой установки употребляли способ с зондом, при котором происходило явление электропроводности углеводородного пламени.

При проведении разных исследований, связанных с изучением черт пламени, характеристик рабочего процесса и вредоносных выбросов на практике употреблялся способ снятия разных черт мотора. Любая черта представляет собой определенную зависимость характеристик сгорания и пламени, какие имеют все шансы поставить разные характеристики ДВС. С целью разобраться с воздействием химического состава ТВС на характеристики сгорания и экологические характеристики к горючему добавлялся водород. Поскольку изучения добавок водорода в ТВС соединено с конкретным воздействием на процесс сгорания в поршневом двигателе, то в качестве главных черт при проведении опыта целенаправленно использовали регулировочные характеристики по составу смеси и углу опережения зажигания. Такие свойства разрешают более полно поставить воздействие параметров горючего на характеристики сгорания и индивидуальности протекания рабочего процесса. Для получения итогов разбора действия химического состава топливно-воздушной смеси с добавлялся водорода в горючее. К примеру, исследование добавок водорода в ТВС тесно соединено с конкретным действием на процесс сгорания в двигателе, то в качестве ведущих данных при проведении целенаправленных экспериментов применялись свойства регулировочных характеристик по составу смеси и УОЗ.

Отсюда следует, что являющимися причинами в проведённых исследованиях являлись: состав смеси, прибавляемый водород в ТВС, УОЗ и частота вращения коленчатого вала. Сообразно результатам изучений смогли построить, регулировочную характеристику по составу смеси при различных причинах, при которых, следовательно, модифицировалось сосредоточение оксида азота. В процессе изучений проводились последующие измерения разных величин: частота вращения коленчатого вала, расход бензина, воздуха и водорода, УОЗ, индикаторное влияние, количество вырабатываемого оксида азота, степень сжатия и характеристик ионизации.

С достижением лучшего приготовления гомогенной смеси лёгкий заряд на впуске подогревается электрическим нагревателем и использует долговременную температуру  $54^{\circ}\text{C}$ , которая поддерживается датчиком температуры с обратной связью. Еще производился контроль над параметрами, какие охарактеризовывают атмосферные условия (влияние, влажность, температура) и положение установки (температура охлаждающей воды и температура масла в картере). Экспериментальный аппарат может позволить без видимых причин видоизменять степени сжатия ( $\epsilon$ ). В устройство конфигурации степени сжатия вступает направляющая и червячная передача, позволяющая смещать головку и видоизменять степень сжатия от 4 по 10 ( $\epsilon$ ). Процесс измерения предоставленного параметра исполнялось индикатором, установленном на платике головки цилиндра.

Для того чтоб найти коэффициент излишка воздуха, сотрудники спроектировали и собрали систему измерения воздуха и расхода горючего.

Горючее набиралось в мерный сосуд для процесса проведения регистраций расхода. Система подачи топлива прокачивалась помпой для удаления воздуха и наполнения топливом. Поплавковая камера работала вместе с расходной емкостью, в таковой ситуации, при неизменном поддержании уровня горючего в поплавковой камере, миниатюризируется размер расходной емкости, которая находится на весах с целью последующего определения массу расхода горючего.

Система для определения количества расходуемого горючего содержит лабораторные весы BM 512, второй класс точности. Весы с компьютером связаны с помощью COM-порта.

Весы были смонтированы таким образом, чтобы высота их установки обеспечивала поступление топлива в поплавковую камеру за счёт перепада высот без нарушения герметичности уплотнений. В системе подачи топлива не предусматривалось наличие устройств для слива оставшегося топлива в заправочный бак. Существующая система подачи топлива обеспечить расходование экспериментальной установкой всего горючего из поплавковой камеры, поступающего из измерительного сосуда. Для обеспечения постоянного уровня топлива использовался указатель уровня .

Лабораторные весы с измерительным сосудом (ёмкостью), смонтированные на необходимой высоте, показаны на рисунке 2.2.1.



Рисунок 2.2.1 –  
Лабораторные весы с  
измерительным сосудом  
BM 512

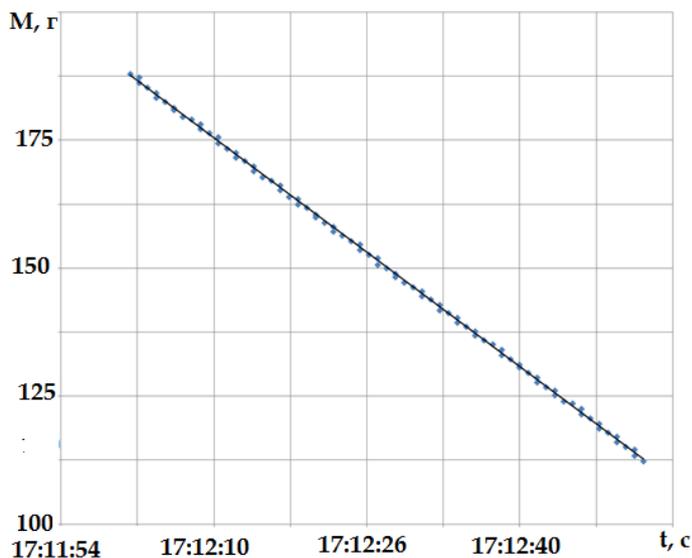


Рисунок 2.2.2 –Результаты тарировки  
показаний весов

Весы были соединены с компьютером (ПК) через COM-порт. Измерение времени происходило сразу с измерением массы. Обмеривание массы в процессе опыта происходило через каждые 0,1 с. Итоги измерений регистрировались

при поддержке особого программного обеспечения и сразу сохранялись в памяти персонального компьютера. Результаты тарировки весов для проведения экспериментов и обработки результатов измерений показан на рис. 2.2.2..

Расход топлива  $G_T$  определялся по формуле

$$G_T = \frac{\Delta M}{\Delta \tau},$$

$\Delta M$  – показания изменения массы топлива;

$\Delta \tau$  – промежуток времени при измерении изменения массы топлива.

Для того чтобы найти соответствие соотношений компонентов состава горючей смеси была изобретена, изготовлены узлы для сборки системы измерения расхода воздуха схема системы представлена На рисунке 2.2.3 показаны основные элементы разработанной систмы.

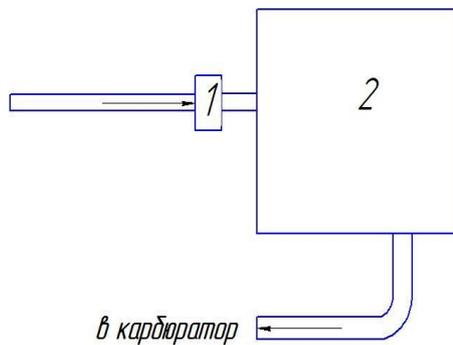


Рисунок 2.2.3 – Схема системы измерения расхода воздуха:

1- датчик массового расхода воздуха, 2 – ресивер

Внедрение ресивера (2) поспособствовало значительно понизить пульсацию воздуха для четкого снятия расхода воздуха. Для измерения массового расхода воздуха использовался термоанемометрический датчик расхода воздуха типа BOSCH. Датчик был усовершенствован сотрудниками кафедры и предварительно откалиброван с поддержкой сужающего устройства на

равномерном потоке. Кроме этого, датчик был откалиброван и проверен в критериях работы двигателя с внедрением конфигурацией впускного трубопровода и ресивера. Испытания осуществляли 2-мя методами:

- объемным методом (при двигателем этом расходовался ограниченный объем воздуха, но обеспечивалось постоянное давление во впускном канале);

- сопоставлением с результатами измерений по широкополосному датчику определения концентрации кислорода (ф. ETAS) одновременно с измерением массового расхода топлива.

Калибровочную кривую можно рассмотреть на рисунке 2.2.4. Можно наблюдать, что кривая полученных данных отлично аппроксимировалась полиномом второй степени.

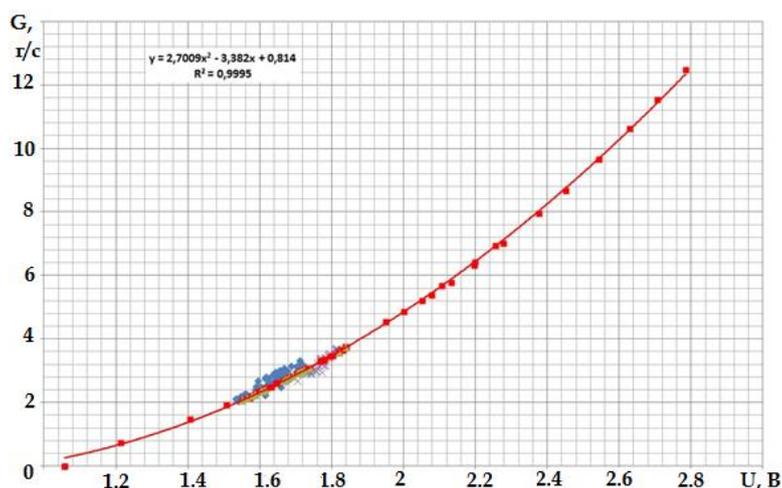


Рисунок 2.2.4 –Тарировочная кривая датчика расхода воздуха

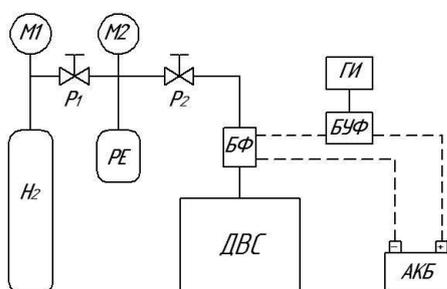


Рисунок 2.2.5 – Система добавки водорода в ТВС:

H<sub>2</sub> - баллон с водородом; M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> – манометры; P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> – редукторы; PE –расходная емкость; БФ – блок форсунок; БУФ – блок управления форсунками; ГИ – генератор импульсов; АКБ – аккумуляторная батарея

Стенд лаборатории оснастили системой подачи водорода в двигатель, схему, которой, можно увидеть на рисунке 2.2.5. Система работала согласно принципу: водород из баллона высочайшего давления через редукторы и блок из четырёх форсунок втекает во впускной канал установки.

Устранение флуктуации давления газа во впускном канале осуществлялось поддержанием перед форсунками постоянного перепада давления, равного  $\Delta P = 0,35$  МПа.

Подобранная экспериментально скважность форсунок обеспечивала заданный расход газа через систему. Можно было выключить некоторое количество форсунок либо одну, для того чтобы поменять расходную характеристику форсунок. Таким образом, зависимость от тарировки изменяется на величину расхода водорода, которую разрешено приостановить отключив форсунку.

Для определения положения коленчатого вала относительно мёртвых точек был спроектирован и изготовлен специальный зубчатый диск, имеющий 60 зубцов и маркеры ВМТ и НМТ, который был смонтирован на носок коленчатого вала. Регистрация положений зубчатого диска относительно ВМТ и НМТ и сохранение результатов измерений, используемых для работы с индикаторными диаграммами осуществлялась с помощью оптического датчика Honeywell. Неточность изготовления зубчатого диска являлась основной причиной погрешностей. Также погрешности вносились из-за шума при регистрации сигналов, а также из-за ошибок при обработке и проведении анализа результатов, записанных на АЦП.

На рисунке 2.2.6 показана фотография зубчатого диска и оптического датчика положения коленчатого вала.

Определение значения угла опережения зажигания осуществлялось использованием электромагнитного датчика который был соединён с высоковольтным проводом системы зажигания (рисунок 2.2.7). Датчик получал сигнал во время прохождения высоковольтного импульса в свече зажигания, Полученный сигнал преобразовывался в прямоугольный и передавался для сбора и регистрации экспериментальных данных.

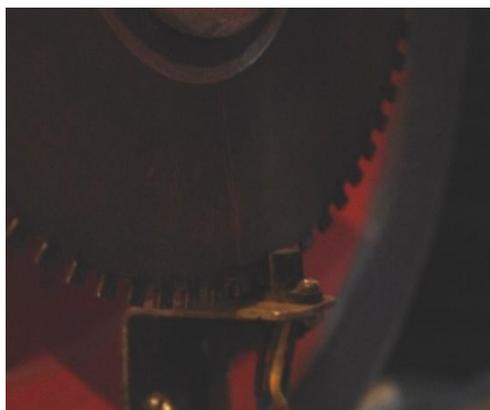


Рисунок 2.2.6 –  
Фотография зубчатого диска и  
оптического датчика



Рисунок 2.2.7 – Фотография  
электромагнитного датчика искры

Для подробного изучения характеристик пламени и параметров процесса сгорания в КС УИТ-85 были установлены ионизационные датчики. Схему установки ионизационных датчиков в КС можно рассмотреть на рисунке 2.2.8. На определенном расстоянии от свечи зажигания были определены два зонда, на одной линии по ходу движения пламени. Путь распространения пламени был заранее оценен с помощью поворота датчика для расположения электродов датчика в одной плоскости со свечой зажигания и перпендикулярно ей.

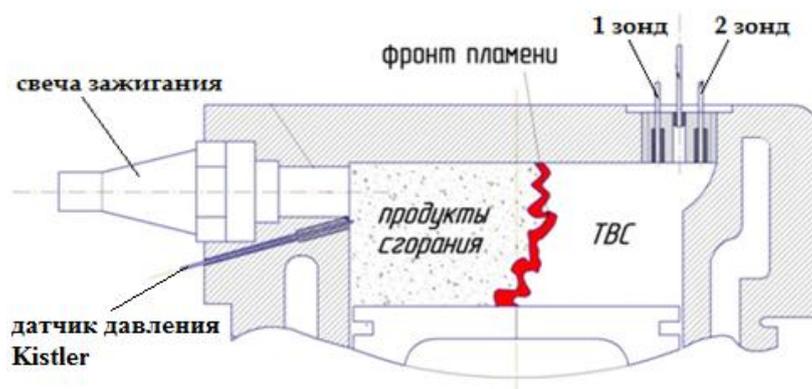


Рисунок 2.2.8 – Схема установки датчиков ионизации и давления  
в камере сгорания

Общее устройство корпуса ионизационных зондов, устанавливаемых в

головку камеры сгорания, можно посмотреть на рисунке 2.2.9. Датчик ионизации имеет два электрода на торце корпуса, расположенные в удалённой от неё зоне камеры сгорания на расстоянии 74 и 88 мм от свечи зажигания. Эскиз расположения электродов датчика ионизации представлен на рисунке 2.2.10.

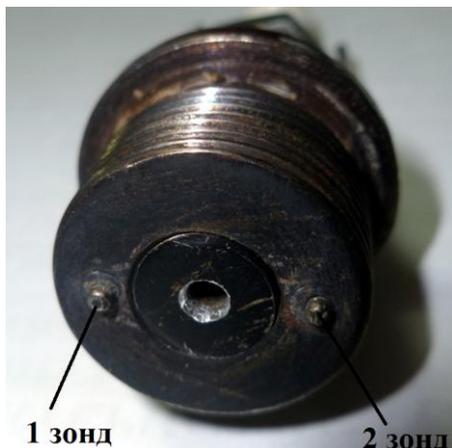


Рисунок 2.2.9 – Общий корпус датчика с ионизационными зондами

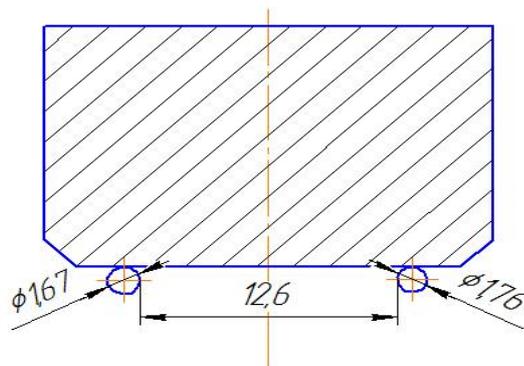


Рисунок 2.2.10 – Эскиз расположения 2-х электродов на торце корпуса

Для снятия значений ионного тока с электродов ИД была изобретена и сделана система возбуждения, отслеживания и анализа ионных токов в КС ДВС. Главным составляющим элементом являлся регулируемый источник неизменного напряжения Mastech DC Power Supply NY3001E. Источник питания был обустроен неполярным конденсатором для убавления пульсаций на выходе источника питания, поскольку измерялись небольшие токи. Не считая только этого, обеспечивалось отключение источника питания от конденсатора, для использования заряда, чтобы исключить помехи распространяемые источником питания. Для этого нужна корректировка показателей конденсатора и возможные исправления. Когда фронт пламени омывал электрод и элементы камеры сгорания, происходило замыкание электрической цепи с появлением в ней ионного тока, возникающего из-за химической ионизации в пламени углеводородного топлива.

Регистрация ионного тока и обработка итогов измерений проводилась с помощью специально разработанного программного обеспечения для использования на ПК. Конструктивные особенности установки, выбор точки заземления на элементе корпуса и обеспечение техники сохранности регистрируемых параметров пришлось изобрести систему гальванической развязки, встроенную в высоковольтную цепь побуждения ионного тока и в сигнальную цепь, связанную с АЦП.

Электрическая схема записи ионного тока с встроенной гальванической развязкой представлена на рисунке 2.2.11

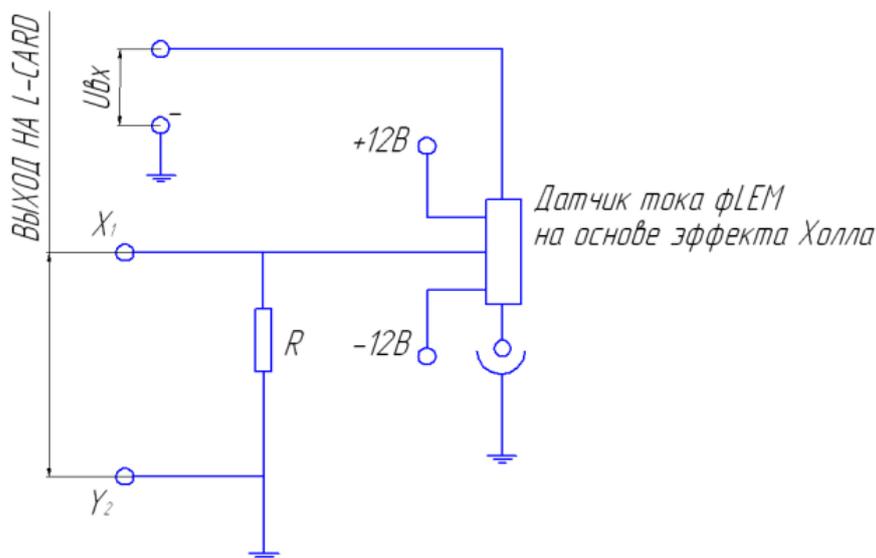


Рисунок 2.2.11 –Электрическая схема записи ионного тока с встроенной гальванической развязкой

Для разбора энергетических характеристик процесса горения в ДВС изобретена система индицирования. Предоставленная система охватывает следующие главные составляющие:

- датчик давления, смонтированный в головку камеры сгорания, и отвечающий потребностям сообразно динамическим погрешностям и обладающий термостабильностью обладающий;
- датчик давления с усилителем сигнала;
- система регистрации положения коленчатого вала относительно ВМТ

и НМТ;

- комплекс для регистрации результатов измерения.

Измерение величины давления осуществлялось с помощью датчика давления фирмы Kistler (Швейцария). Датчик совмещен в одном корпусе со свечой зажигания и владеет последующими свойствами:

- тип 6117BFD17 номер в серии 992713, прокалиброван 03.12.2009 г, усилитель Kistler 5011B № 602394;

- диапазон, определяющий чувствительность:

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 отработавших газов определялся при использовании газоанализатора «Автотест» фирмы Мета класс точности 0. При проведении анализа отработавшего газа определялась концентрация следующих компонентов: CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>.



Рисунок 2. 2.12 –  
Газоанализатор фирмы Мета

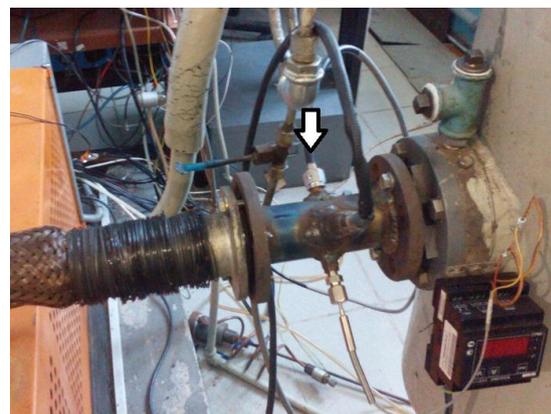


Рисунок 2.2.13 – Фотография  
места отбора проб ОГ (показано  
стрелкой)

На рисунке 2.2.12 представлена фотография микропроцессорного газоанализатора.

Работоспособность газоанализатора обеспечивалась специально разработанной системой отбора и остывания проб отработавших газов в выпускном трубопроводе. Фотография места отбора проб ОГ представлена на рисунке 2.2.13. Отбор газа производится из мерного участка в выпускном трубопроводе через особый штуцер, потом подается в систему остывания и конденсации воды, потом подается через фильтр в газоанализатор. Перемещение газа выполняется особым насосом (побудителем расхода) интегрированным в систему газоанализатора.

Регистрация и хранение сигналов датчиков осуществляется применением системы сбора данных L - 783M(создание L-Card). Всем пригодная скоростная цена на шину PCI, которая обеспечивает возможность ввода в мегагерцовом спектре аналоговых сигналов, а для цифровых сигналов - ввод/вывод. Свойства АЦП: 12 бит/ 3МГц, количество рабочих каналов 16.

Подготовительный анализ сигналов нужен для выявления недостоверных данных при работе каждой системы регистрации параметрических (положение вала коленчатого, отметчика искры зажигания, массового расхода воздуха, горючего) факторов и результатов исследований. В процессе подготовительного разбора оценивается присутствие сигналов, соответствие знаков – помеха, отклик сигналов на существенное модифицирование варьируемых причин, а еще характер записи сигнала при неимении горения, вызванного выключением подачи горючего либо зажигания.

Для получения надежных сигналов, отражающих ионный ток в пламени, распространяющемся в камере сгорания только для одного режима работы нужна статистическая переработка огромной численности осциллограмм поочередных циклов. В этом случае усреднялись не менее 50 циклов, которые записывались в течение одного режима. Проводилась оценка расположения характеристик, оценивался и характер межциклового рассеяния. Для подавляющего большинства режимов определено обычное

расположение характеристик оценки сигналов. Если расположение существенно различалось от обычного, принималось заключение о повторе режима, иногда оно исключалось из обработки.

На рисунке 2.2.14 показана осциллограмма записи исследуемых параметров.

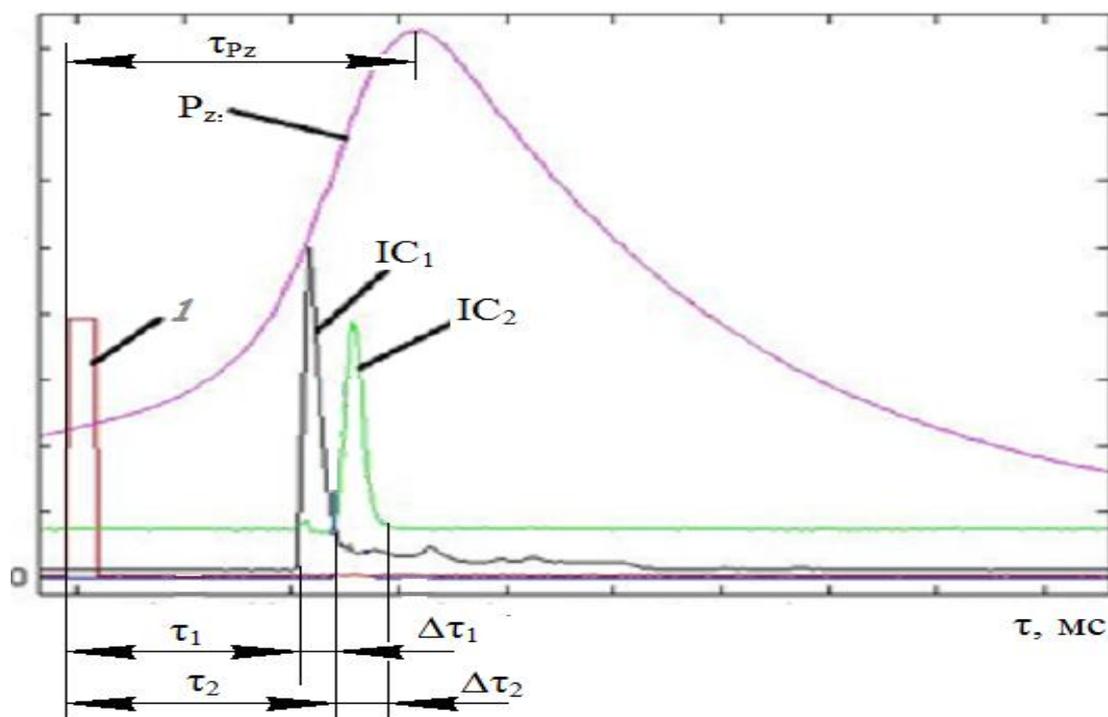


Рисунок 2.2.14 – Осциллограмма записи исследуемых параметров

Длительность импульса существования ионного тока определяется временем омывания пламенем электродов ионизационного датчика ( $\Delta\tau$ ).

Сообразно этим выводам, внедрение данных ионного тока, снятых с электродов ИД, позволяет найти главные свойства пламени. Еще внедрение характеристик электропроводности пламени при одновременной регистрации индикаторного давления и сосредоточении ядовитых компонентов позволяет изучить воздействие варьируемых причин опыта на главные экологические характеристики и характеристики рабочего процесса, тем самым можно выбрать рациональные причины, снижающих

сосредоточение вредоносных выделений.

Определение видимой средней скорости, с которой распространяется пламя производилось по формуле:

$$U_{cp} = \frac{L_1}{\tau_1}, \quad (2.1)$$

Где  $L_1$  – расстояние между соответствующим электродом ИД и свечой зажигания

$\tau_1$  – промежуток времени от подачи зажигания до появления ионного тока в цепи соответствующего электрода ИД, с.

Для определения местной скорости, с которой распространяется пламя, между электродами на торце корпуса датчика использовалась формула

$$U_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{\tau_{1-2}}, \quad (2.2)$$

где  $L_{1-2}$  – расстояние между электродами ИД, м.;  $\tau_{1-2}$  – промежуток времени между появлением ионного тока у соответствующих электродов ИД, с.

Исследование параметров зоны горения, особенно её размеров, в ДВС с искровым зажиганием требует огромных трудовых и материальных издержек, для этого нужно изучить особенности процессов тепло- и массопереноса, распределения температурного поля и состава топливно-воздушной смеси во всем пространстве КС. Но полностью конкретные представления о динамике фронта пламени разрешают заполучить способы, основанные на применении явления ионизации пламени, одним из которых является способ ионизационных зондов. Сообразно этим разборам электропроводность пламени обусловлена хемионизацией пламени углеводородного топлива и охарактеризовывает интенсивность протекания химических реакций горения. Цепные реакции горения протекают по механизмам настолько сложным, что в настоящее время они не имеют адекватного содержания. Они включают в себя, кроме диффузии еще

деление веществ, их деление и конденсацию.

Всесторонний анализ характера искривлённого турбулентного фронта пламени, позволяет допустить возможность определения ширины зоны турбулентного горения при использовании информации, полученной при использовании сигналов ионизационных датчиков .

Анализ результатов исследования особенностей, с которыми пламя распространяется в камере с использованием результатов по измерению ионных токов и давления сгорания [45] выявил, что для ряда режимов испытаний перемещение пламени между свечой зажигания и ионизационным датчиком носит закрученный характер.

В исследованиях ширины зоны турбулентного горение перемещение пламени от свечи зажигания носило прямолинейный характер.

Используя способ определения ширины ЗТГ, описанный в работах [97-101] где имеются некие недочеты при выполнении геометрической оценки  $\delta_{ЗТГ}$  при определении задней границы фронта пламени вследствие допущенных ошибок при расчёте скорости распространения пламени.

Нами разработано простая математическая зависимость для расчёта ширины ЗТГ в виде

$$\delta_{ЗТГ} = U_{1-2} \cdot \Delta\tau_i - D_{эл}, \quad (2.3)$$

где  $\Delta\tau_i$  –промежуток времени между уходом пламени и приходом пламени к  $i$ -тому электроду ионизационного датчика, а, именно промежуток времени, в течение которого регистрируется ионный ток в цепи электрода ИД,  $D_{эл}$  – диаметр электрода ИД.

Сообразно предоставленному способу определения  $\delta_{ЗТГ}$  в качестве отметчика границ перемещающейся зоны горения используются электроды ионизационного датчика. В этом случае, самостоятельно от направленности движения пламени, ширина зоны турбулентного горения есть перемещение в интервале времени существования ионного тока в электрической цепи ИД.

Таковым образом, сообразно результатам опыта были определены главные свойства пламени, определяющие характеристики, с которыми

протекает рабочий процесс в поршневых энергетических установках и моторах.

Определение массовой доли газообразного водорода, который добавляется в ТВС проводилось в соответствии с зависимостью

$$g_{H_2} = \frac{G_{H_2}}{G_{H_2} + G_B}, \quad (2.4)$$

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

### **Глава 3. Взаимосвязь максимального давления сгорания и времени его достижения с шириной зоны турбулентного горения**

В магистерской диссертации Н.А. Дурмановой предложен параметр, обобщающий концентрацию НСН в зависимости от ширины ЗТГ [6]. Определение концентрации несгоревших углеводородов с привлечением разработанного параметра показало хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований. Недостатком предложенной разработки является отсутствие возможности в данный момент определять расчётным путём ширину ЗТГ. Экспериментальных данных по ширине ЗТГ крайне мало. В связи с этим для разработки параметра, обобщающего взаимосвязь концентрации несгоревших СН с характеристиками сгорания, необходимо определить параметр сгорания явно связанный с шириной ЗТГ. В качестве такого параметра, который можно определить расчётным путём, наиболее подходящим является максимальное давление сгорания.

#### **3.1 Определение максимального давления сгорания и времени его достижения**

Рассмотрим, каким образом изменяется максимальное давление сгорания в зависимости от состава смеси, скоростного режима работы и добавки водорода в ТВС. На рис.3.1.1 и 3.1.2 представлены результаты экспериментальных измерений для скоростного режима 600 и 900об/мин, соответственно.

При добавке водорода происходит увеличение максимального давления сгорания во всём диапазоне изменяемых значений коэффициентов избытка воздуха. Прирост давления при стехиометрическом составе смеси составил 6 и 5% для скоростных режимов 600 и 900об/мин, соответственно.

При обеднении смеси этот эффект значительно возрастает и составляет 19 и 30%.

Так как эффективность работы тепловых энергетических установок

определяется максимальным давлением сгорания, то общая эффективность их работы при добавке водорода должна увеличиться в соответствии с увеличением давления.

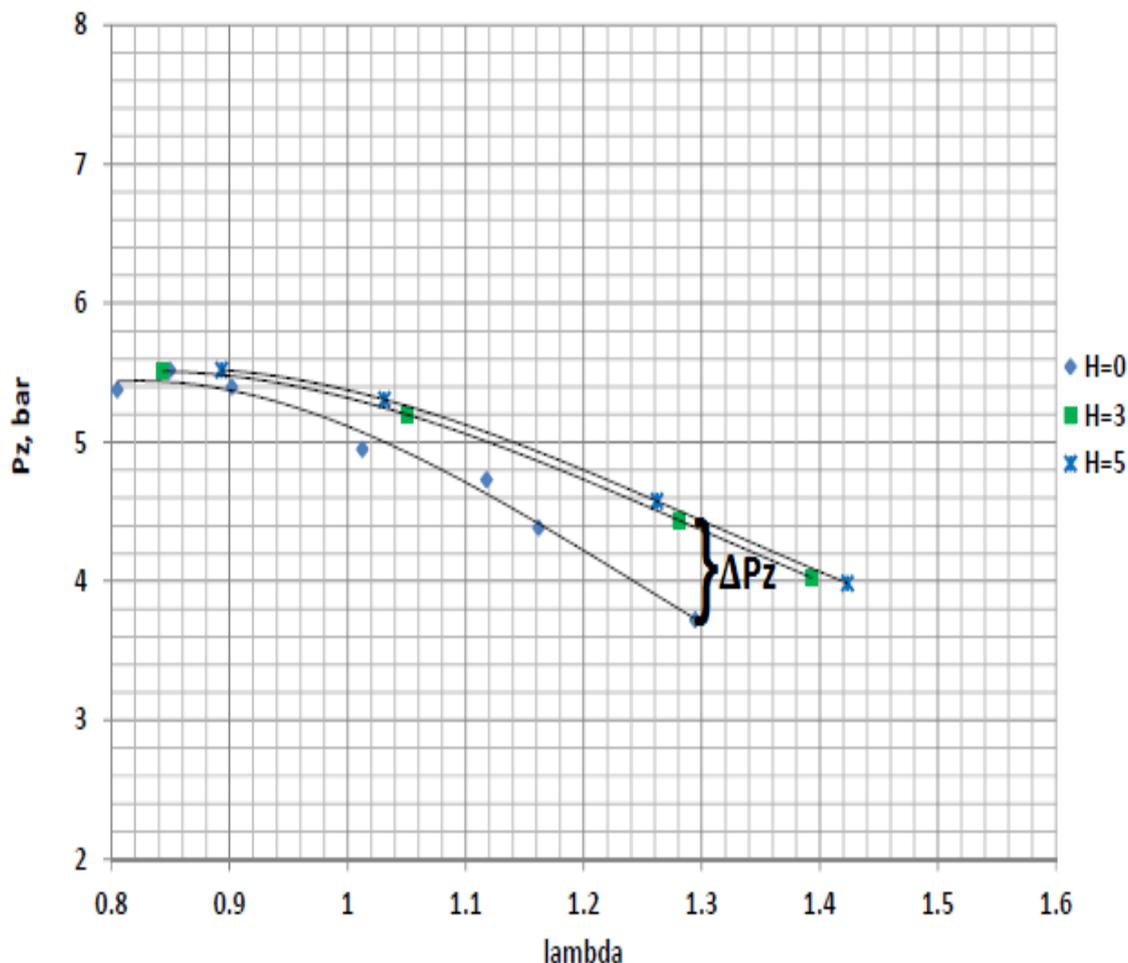


Рисунок 3.1.1 – Результаты измерения давления при сгорании в зависимости от коэффициента избытка воздуха и добавке водорода

$$\text{УОЗ}=16^0, n=600 \text{ об/мин}$$

Результаты измерений показали значительный рост максимального давления сгорания с обеднением состава смеси, для коэффициента избытка воздуха, равного 1,3, при рост величины давления составил  $4,4 - 3,7 = 0,7$  МПа (bar),

В относительных величинах,  $\Delta Pz / Pz(\text{бензин})$ , увеличение эффективности сгорания топливной смеси при добавке водорода и

изменении коэффициента избытка воздуха достигает следующих значений: для коэффициента избытка воздуха, равного 1,3 и скоростного режима 600 об/мин получим прирост 0,19 ; для скоростного режима 900 об/мин и УОЗ = 16 - составил также 0,19.

Анализ результатов испытаний с учётом условий проведения испытаний, показывает, что изменение степени сжатия не отражается на эффективности воздействия добавляемого водорода на процесс сгорания.

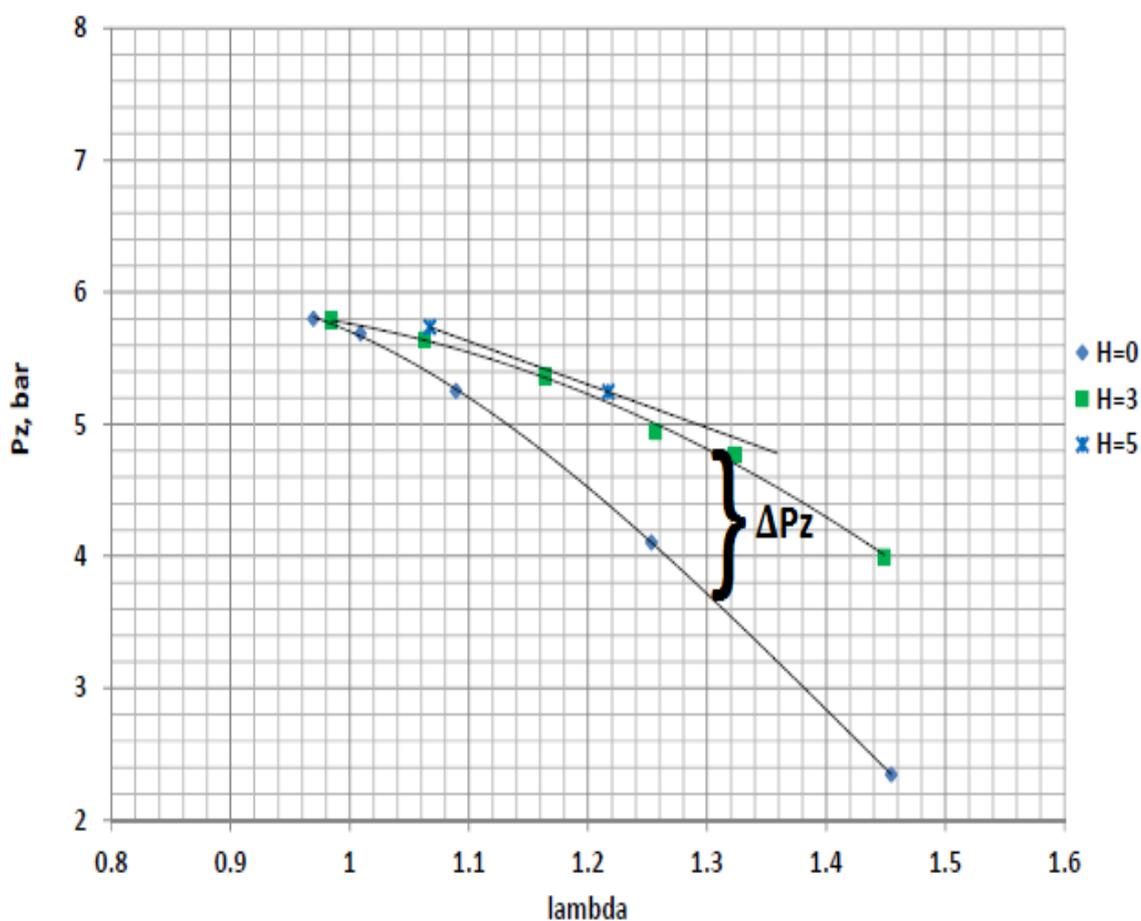


Рисунок 3.1.2 - Результаты измерения давления при сгорании в зависимости от коэффициента избытка воздуха и добавке водорода

УОЗ=21<sup>0</sup>, n=900 об/мин, ε=7,0

Проведём анализ эффективности воздействия водорода на индикаторную работу, выполнив расчёты, аналогичные проделанным расчётам для результатов, представленных на рис. 3.1.1.

В относительных величинах,  $\Delta Pz / Pz(\text{бензин})$ , увеличение

эффективности сгорания топливной смеси при добавке водорода и изменении УОЗ с 16 до 21<sup>0</sup> достигает следующих значений: для коэффициента избытка воздуха, равного 1,3 и УОЗ = 16 получим прирост 0,19 ; для УОЗ = 21- составил уже 0,30..

$$\alpha=1,3 \Delta P_{ZH} / Pz(\text{бензин})_4=(4,95-3,7)/3,7=0,30.$$

Представленные результаты исследования , показанные на рисунках 3.1.1 и 3.1.2 позволяют выявить эффективность влияния добавления водорода на процесс сгорания через изменение индикаторного максимального давления, то есть индикаторную работу, при изменении состава топливной смеси, скоростного режима работы и угла опережения зажигания.

В результате этих исследований экспериментальным путём получено, что эффективность протекания сгорания с добавлением газообразного водорода в топливно-воздушную смесь увеличивается с возрастанием числа оборотов коленчатого вала, определяется углами опережения зажигания. По степени сжатия практически не изменяется.

Одновременно с исследованием характеристик изменения внутрикамерного давления сгорания при изменении режимных параметров работы установки и количества добавляемого в ТВС газообразного водорода проводились измерения, позволяющие определить, в каких промежутках по времени достигались значения максимального давления сгорания от перечисленных выше параметров.

На рис. 3.1.3 показаны результаты изменения промежутков времени, в которых достигалось максимальное значение давления сгорания от указанных параметров для скоростного режима 600об/мин, на рис.3.1.4 для режима 900об/мин.

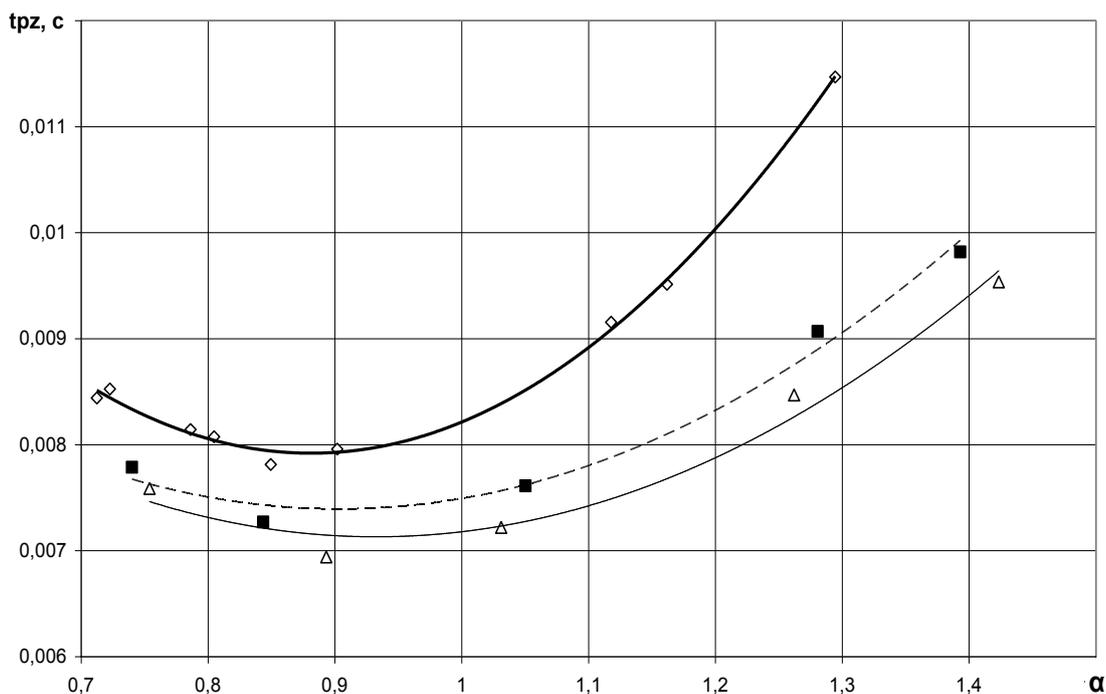


Рисунок 3.1.3 –Время достижения максимального давления ( $t_{Pmax}$ ) в камере сгорания от коэффициента избытка воздуха и добавки водорода ( $n=600$ об/мин):

◇ -  $r_{H_2}=0\%$ ; ■ -  $r_{H_2}=3\%$ ; △ -  $r_{H_2}=5\%$

Минимальное время, при котором достигается максимальное давление при сгорании, регистрируется при составе смеси, близком к стехиометрическому, которому соответствуют максимальные скорости распространения пламени и минимальная ширина ЗТГ. При обогащении или обеднении смеси наблюдается увеличение этого времени. При добавке газообразного водорода происходит уменьшение промежутка времени, в котором достигается давление сгорания во всём диапазоне режимов исследования. В области обеднения смеси этот эффект возрастает. Так при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,0, добавка 3% водорода уменьшает промежуток рассматриваемого времени на 9%, добавка 5% - на 15%. При обеднении смеси до  $\alpha = 1,3$  этот эффект составляет 28 и 35%, соответственно.

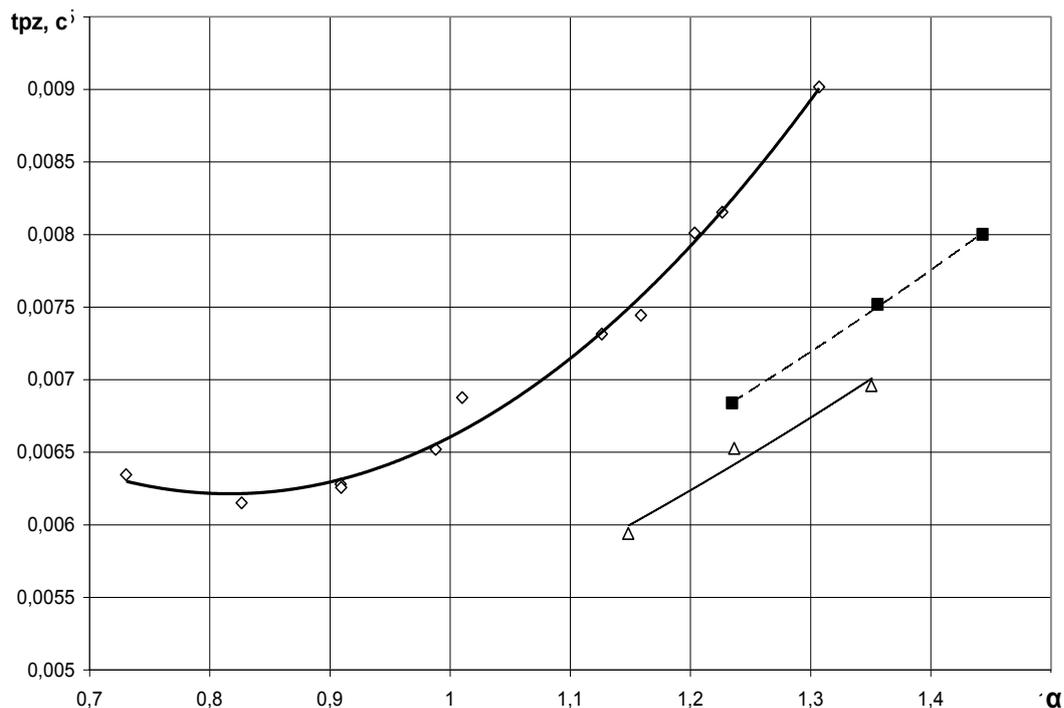


Рисунок 3.1.4 – Время достижения максимального давления ( $t_{Pmax}$ ) в камере сгорания от коэффициента избытка воздуха и добавки водорода ( $n=900\text{об/мин}$ ):

$\diamond$  -  $r_{H_2}=0\%$ ;  $\blacksquare$  -  $r_{H_2}=3\%$ ;  $\triangle$  -  $r_{H_2}=5\%$

Для скоростного режима 900об/мин (рис. 3.1.4) получены аналогичные результаты. Минимальное время, при котором достигается максимальное давление при сгорании, регистрируется при составе смеси, близком к стехиометрическому, которому соответствуют максимальные скорости распространения пламени и минимальная ширина ЗТГ. При обогащении или обеднении смеси наблюдается увеличение этого времени. При добавке газообразного водорода происходит уменьшение промежутка времени, в котором достигается давление сгорания во всём диапазоне режимов исследования. В области обеднения смеси этот эффект возрастает.

### 3.2 Закономерности, определяющие связь максимального давления при сгорании и времени его достижения с шириной ЗТГ

На рис. 3.2.1 приведены зависимости расположения границ, определяющих ширину зоны турбулентного горения, и приведенного тока ионизации от коэффициента избытка воздуха и количества добавок газообразного водорода относительно положения наибольшей величины тока ионизации во фронте пламени.

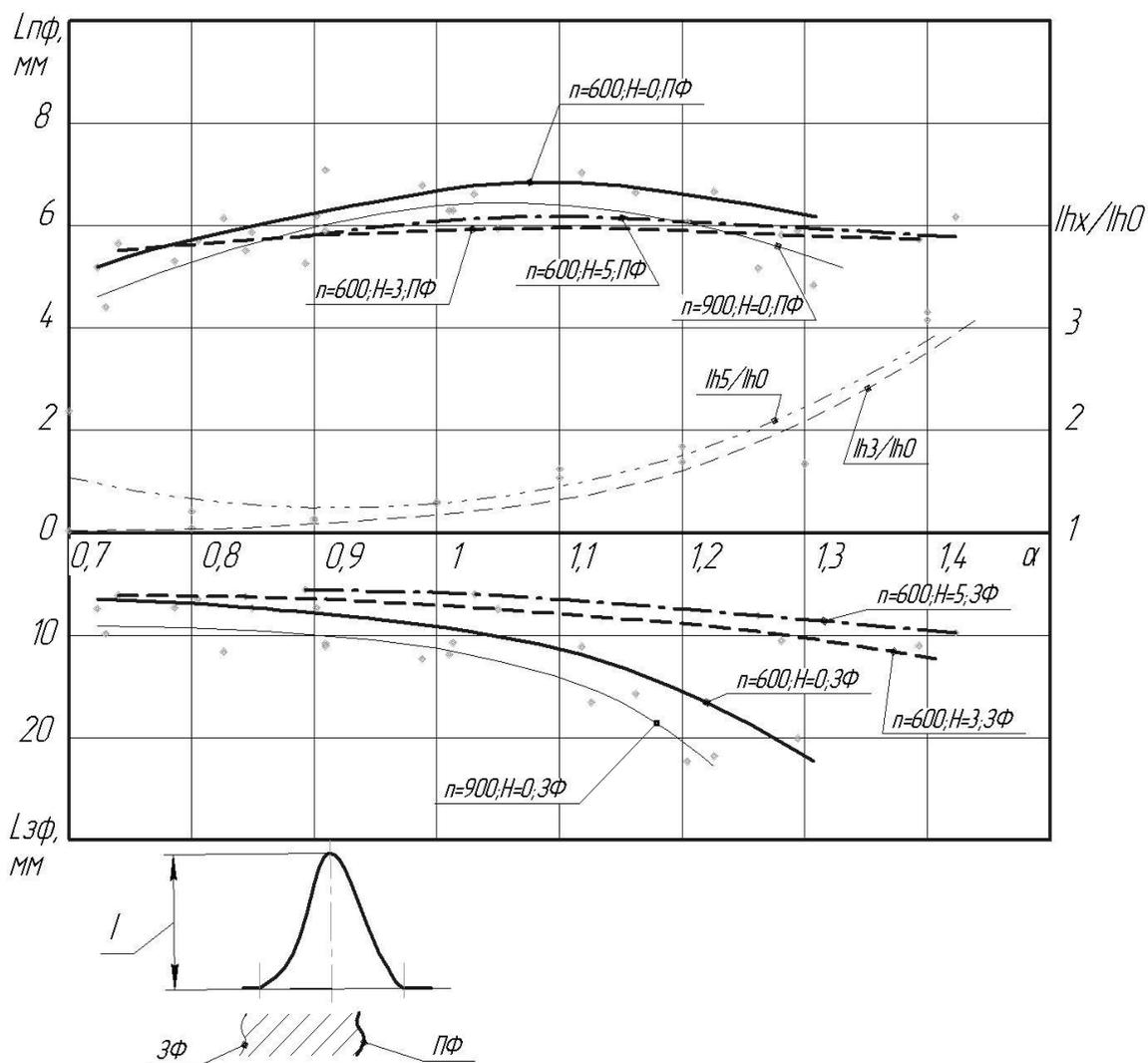


Рисунок 3.2.1- Расположение границ зоны турбулентного горения по отношению к положению пика ионного тока в зоне горения

В качестве оси абсцисс использовано расположение максимальной величины ионного тока по отношению к передней и задней границы ЗХР;  $L_{пф}$  и  $L_{зф}$  – обозначения передней и задней границ зоны протекания химических реакций горения, соответственно;  $n$  – скоростной режим

вращения КВ; Н - массовый расход добавляемого водорода в %; ПФ и ЗФ – передняя и задняя граница зоны горения;  $I_{hx}/I_{h0}$  – приведенная величина ионного тока при добавке водорода к ионному току при сгорании бензовоздушной смеси;  $\alpha$  – состав смеси.

При увеличении коэффициента избытка воздуха ширина зоны турбулентного горения (ЗТГ) возрастает. Причём расстояние от положения максимального значения тока ионизации и передней границей ЗТГ увеличивается незначительно, Основной рост ширины ЗТГ обусловлен за счёт возрастания промежутка, увеличивающегося между положением максимального значения тока ионизации и завершающей границей зоны горения.

С добавкой водорода в топливно-воздушную смесь происходит заметное сокращение ширины ЗТГ. Отмечается, что расстояние между передней границей ЗТГ и положением пика ионного тока в ней сокращается незначительно, а основное уменьшение ширины ЗТГ достигается сокращением расстояния между задней границей ЗТГ и положением пика ионного тока.

Характер изменения ионного тока, приведенного на графике в относительном виде к величине тока при коэффициенте избытка воздуха, равного единице, позволяет сделать вывод о причине сокращения ширины ЗТГ с добавкой водорода. Добавке водорода приводит к возрастанию тока ионизации и, следовательно, химические реакции горения интенсифицируются, что приводит к увеличению нормальной скорости распространения пламени. А так как ширина ЗТГ определялась вблизи стенки камеры сгорания, то есть в заключительной фазе сгорания, когда интенсивность турбулентности наименьшая, то происходил значительный рост суммарной скорости сгорания. Увеличение скорости распространения пламени является определяющей в сокращении ширины ЗТГ при добавке водорода в топливно-воздушную смесь.

Так для коэффициента избытка воздуха 1,3 при добавке водорода

ионный ток возрастает в два раза, что вызывает уменьшение расстояния между положением пика ионного тока в ЗТГ и задней границей ЗТГ также в два раза.

Проанализируем каким образом полученные результаты, определённые для ширины ЗТГ могут повлиять на эффективность работы двигателя и концентрацию несгоревших углеводородов в отработавших газах (ОГ).

При уменьшении ширины ЗТГ время сгорания топливно-воздушной смеси значительно сокращается. При этом сгорание завершается при меньшем объёме камеры сгорания и, следовательно, при более высоком значении давления. Как известно из термодинамики подвод тепла при более высоком давлении приводит к повышению коэффициента полезного действия тепловой машины. Кроме этого при уменьшении объёма сгорания сокращается и площадь её поверхности, что уменьшает потери тепла в стенки камеры сгорания.

Следовательно, произойдёт увеличение эффективности работы энергетической установки.

Как было рассмотрено в первой главе, основным источником несгоревших углеводородов является замораживание химических реакций горения в пристеночных слоях и в зазорах. При сокращении ширины ЗТГ и интенсификации химических реакций горения (увеличение ионного тока) за счёт добавки водорода происходит уменьшение толщины слоя несгоревших углеводородов у стенки цилиндров и в зазорах, что и определяет уменьшение их концентрации в отработавших газах.

Так как основные характеристики распространения пламени: скорость распространения, ширина фронта пламени и время сгорания определяют сгорания, то между ними существует непосредственная связь. Определим эту связь на основе обработки экспериментальных данных.

На рис. 3.2.2 представлены результаты экспериментального исследования, определяющие зависимость величины максимального

давления в процессе сгорания от ширины ЗТГ при изменении режимных параметров работы и физикохимических свойств ТВС за счёт добавки водорода.

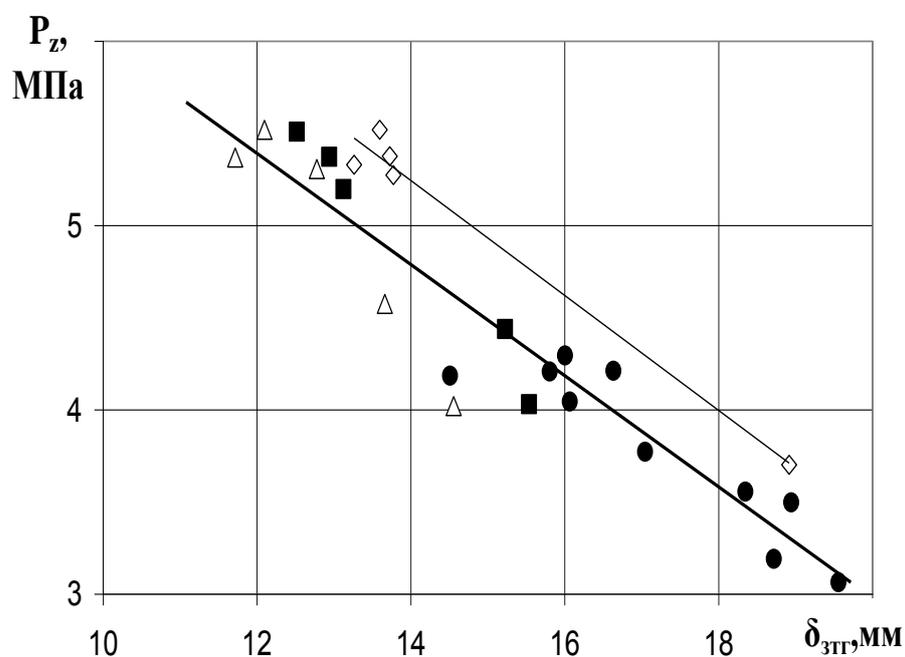


Рисунок 3.2.2 –Максимальное давление при сгорании ТВС, различного состава и его связь с шириной зоны турбулентного горения:  
 $n=600$  об/мин, добавка водорода: ●-0%, ■-3%, △-5%;  $n=900$  об/мин;  
 водород: ◇-0%

Проанализируем результаты экспериментального исследования по влиянию размеров ширины ЗТГ на изменение давления в пределах основной фазы сгорания в зависимости от количества добавки газообразного водорода в ТВС, представленные на рисунке 3.2.2.

С уменьшением ширины зоны турбулентного горения давление  $P_z$  линейно увеличивается, причём влияние добавки водорода, изменение скоростного режима в диапазоне исследований проявляется через изменение ширины зоны турбулентного горения.

Причиной подобного поведения максимального давления сгорания является, как уже отмечалось, интенсификация химических реакций горения,

приводящая к сокращению ширины ЗТГ. При этом ширина ЗТГ может служить одним из параметров, определяющим характеристики распространения пламени.

Приведенные результаты показывают линейную связь между максимальным давлением сгорания и шириной ЗТГ. При увеличении скоростного режима работы зависимость давления сгорания от ширины ЗТГ смещается параллельно вверх.

Известно, что при увеличении скоростного режима происходит рост пульсационной скорости перемещения топливно-воздушной смеси в камере сгорания пропорционально корню квадратному из величины скоростного режима.

$$U' = (n_{900}/n_{600})^{1/2} \quad (3.1)$$

В результате возрастает турбулентная скорость распространения пламени. Вследствие этого завершение сгорания произойдет при меньшем объеме, что влечет за собой рост максимального давления сгорания.

Выведем линейные уравнения, связывающие ширину ЗТГ с максимальным давлением сгорания.

$$\Delta_{змг} = (P_z - A_i) / -B, \quad (3.2)$$

где  $B = 3$ ;

$$A_i = A_{600} * (n_i/n_{600})^{1/3}; \quad (3.3)$$

$A_{600}$  для безводородовоздушной смеси и скоростного режима  $n = 600$  об/мин равно 41,5.

В полученной зависимости коэффициент  $A_i$  соответствует конкретному скоростному режиму, отличающемуся от режима 600 об/мин.

При определении максимального давления сгорания были определены зависимости времени достижения этого давления от момента зажигания. Данные измерений представлены на рис. 3.2.3.

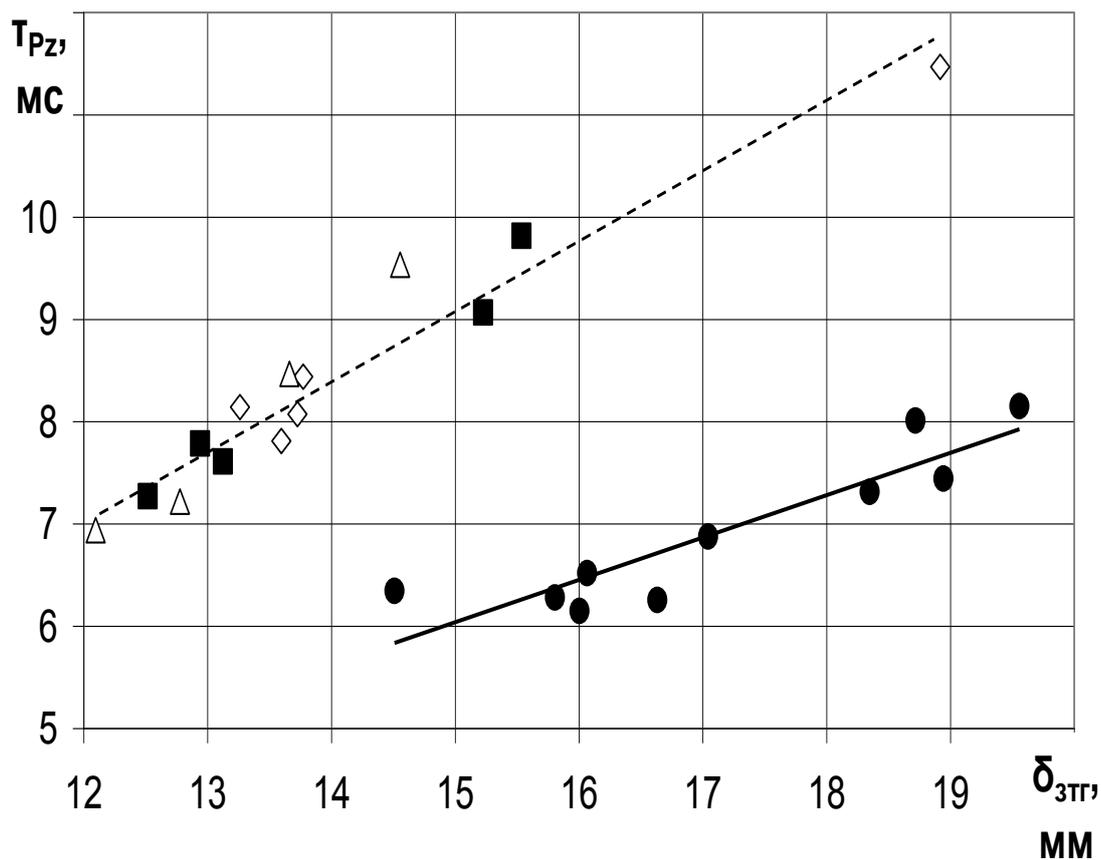


Рисунок 3.2.3 – Взаимосвязь протяжённости основной фазы сгорания с шириной зоны турбулентного горения

С уменьшением ширины ЗТГ происходит значительное уменьшение времени достижения максимального давления сгорания (время сгорания в основной фазе) во всём диапазоне проведения исследований. Как отмечалось выше, при этом происходит увеличение максимальной величины давления при сгорании и уменьшение объёма, в котором завершается сгорание, что в конечном итоге приводит к росту эффективности работы энергетических установок.

Так как при уменьшении объёма завершения сгорания уменьшается и площадь поверхности камеры сгорания, то сокращается и объём пристеночных замороженных слоёв несгоревшей топливно-воздушной смеси. Следовательно, произойдёт уменьшение доли непрореагирующих до конца углеводородов в выпускных газах.

Когда ширина зоны турбулентного горения увеличивается происходит линейное увеличение промежутка времени, при котором достигается максимальное давление,  $P_{z\max}$ , причём доля добавляемого водорода в ТВС и частота вращения коленчатого вала проявляются в изменении ширины ЗТГ.

Приведенные результаты показывают линейную связь между временем достижения давления сгорания максимальной величины с шириной ЗТГ. При увеличении оборотов вращения зависимость времени сгорания от ширины ЗТГ смещается параллельно вниз. Причём, если отбросить левую нижнюю точку для скоростного режима 900об/мин, то линии полученных зависимостей будут параллельны.

Представленные на рис. 3.2.3 зависимости можно в виде линейного уравнения в виде

$$T_z = A + B * \delta_{z\max}, \quad (3.4)$$

где коэффициент А определяет влияние скоростного режима, коэффициент В – угол наклона зависимости  $\tau_z$  относительно оси абсцисс.

Анализ результатов исследования, представленных в данной главе, позволяет сделать вывод, что параметром, наиболее адекватно определяющим выбросы вредных выделений по несгоревшим углеводородам в ОГ, является величина максимального давления при сгорании ТВС.

## Глава 4. Разработка параметра, обобщающего взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов с максимальным давлением сгорания

На рисунке 4.1 показано как ширина ЗТГ влияет на изменение концентрации непрореагировавших до конечного состояния СН [2].

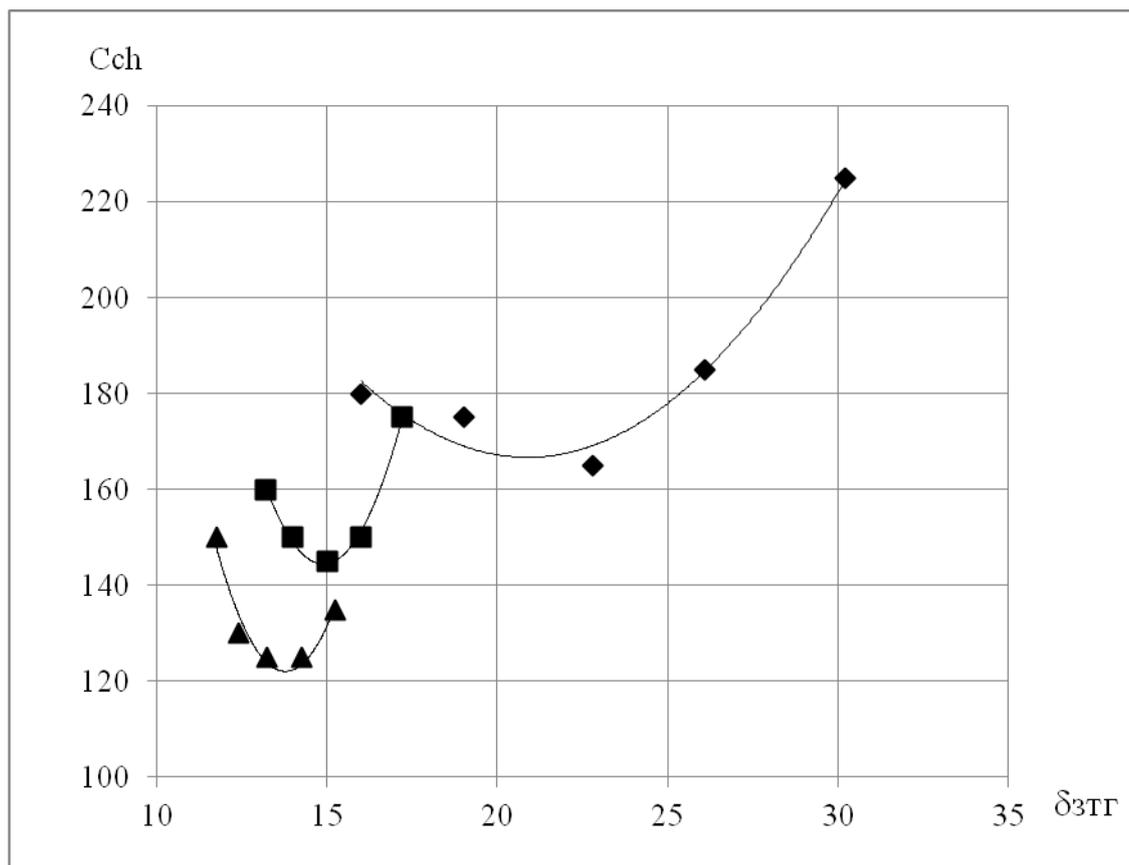


Рисунок 4.1 - Концентрация несгоревших СН и её связь с шириной ЗТГ  
Добавка водорода:  $\blacklozenge$  - 0%;  $\blacksquare$  - 3%;  $\blacktriangle$  - 5%;

Видно, что происходит уменьшение концентрации несгоревших СН с добавлением определенного количества водорода во всем диапазоне изучаемых составов смеси.

Характер изменения концентрации СН при изменении размеров ЗТГ зависит от интенсификации, с которой протекают химические реакции

горения, оцениваемой по изменению ионного тока. В начале с уменьшением ширины ЗТГ происходит увеличение ионного тока (рост интенсивности химических реакций горения), что приводит к понижению доли непрореагировавших СН. Минимум выбросов вредных выделений по углеводородам соответствует составу смеси вблизи стехиометрии ( $\alpha \approx 1,1 - 1,2$ ). Затем при дальнейшем обогащении смеси наблюдается снижение интенсивности протекания химических реакций горения и, несмотря на уменьшение ширины ЗТГ, происходит рост концентрации несгоревших СН.

Проанализировав данные с графиков, составим таблицу данных, для зависимостей  $C_{CH}=f(\tau_z)$  и  $C_{CH}=f(P_z)$  при  $g_{H_2}=0\%$ ,  $g_{H_2}=3\%$  и  $g_{H_2}=5\%$  при  $n=600$  об/мин:

Таблица – Зависимость концентрации СН от характеристик сгорания ТВС и добавок водорода

	1			1,1			1,2			1,3			1,4		
$H, \%$	0	3	5	0	3	5	0	3	5	0	3	5	0	3	5
$C_{CH}$ ppm	190	160	130	179	155	125	174,9	149	123	175	145	122	170	150	125
$\delta_{эмз}$ мм	15,5	13	12,5	16,4	13,3	13	17,8	14,2	13,5	19	15	14	20	16	14,5
$\tau_{pz}$ мсек	9,5	7,7	7	10,3	8,1	7,4	11	8,3	8	11,5	9,1	8,5	12,5	9,8	9,5
$P_z$ МПа	4,8	5,3	5,6	4,5	5,2	5,5	4,1	4,7	5	3,5	4,5	4,8	0	4,2	4,6

В диссертации Дурмановой Н.А. [6] получена зависимость для безразмерного комплекса  $\Phi$ , связывающего концентрацию НСН с составом смеси с использованием в качестве параметров ширину ЗТГ и приблизительное содержание углерода и водорода в ТВС, в виде

$$\Phi = C_{CH} * (\delta_{\sigma+H} / \delta_{\sigma})^{2,5(gH/gC)}, \quad (4.1)$$

где  $C_{снб}$  и  $\delta_{\delta}$  – концентрация несгоревших СН и ширина ЗТГ в процессе сгорания топливно-воздушной смеси без добавки водорода;

$\delta_{\delta+n}$  - ширина ЗТГ при сгорании бензовоздушной смеси с добавкой водорода;

$2,5(gH/gC)$  – степень для учёта массового отношения содержания водорода и углерода в ТВС.

Так как ширину ЗТГ у стенок камеры сгорания определить достаточно сложно даже экспериментально, то в качестве параметра, определяющего  $C_{сн}$ , выберем такой, который связан с шириной ЗТГ и может быть определен расчетным путем, например по методу Вибе [4]. Рассмотрим параметры в завершающей фазе сгорания и выберем  $P_z$  – максимальное давление сгорания.

Проведение анализа добавок водорода и обобщение результатов их влияния при определении концентрации несгоревших углеводородов СН выполним заменой в формуле (1) для  $\Phi$  параметр  $\delta_{\delta+n}$  на параметр  $P_z$ .

Для получения зависимости  $C_{сн}=f(P_z)$  обработаем данные из рисунков 3.2.1 и 4.1 и таблицы в виде

$$\delta_{зтг} = (P_z - A_i) / -B, \quad (4.2)$$

где  $B = 3$ ;  $A_i = A_{600} * (n_i/n_{600})^{1/3}$ ;  $A_{600}$  для безводородовоздушной смеси и скоростного режима  $n = 600$  об/мин равно 41,5.

Таким же способом можно провести обработку экспериментальных данных и получить зависимость в виде

$$\tau_z = A + B * \delta_{зтг}, \quad (4.3)$$

используя взаимосвязь, связывающую время достижения максимального давления сгорания в цилиндре и ширины ЗТГ, которые представлены на рисунке 3.2.2.

Используя данные таблицы, подставим в формулу (1) параметры  $P_z$  и получим зависимость для безразмерного комплекса:

$$\Phi_{pz} = C_{снб} * [(P_{zn} - A_i) / (P_z - A_i)]^{2,5(gH/gC)}, \quad (4.4)$$

где,  $P_z$  – максимальное давление цикла при сгорании бензовоздушной смеси;

$P_{zn}$  – максимальное давление цикла при сгорании бензоводородовоздушной смеси;

$A_i$  – коэффициент, учитывающий скоростной режим работы;

$C_{снб}$  – концентрация несгоревших СН при сгорании бензовоздушной смеси;

$2,5(g_H/ g_C)$  – степень для учёта массового отношения содержания водорода и углерода в ТВС.

Оценим адекватность полученной зависимости с экспериментальными данными по результатам представленными на рисунке 4.2.

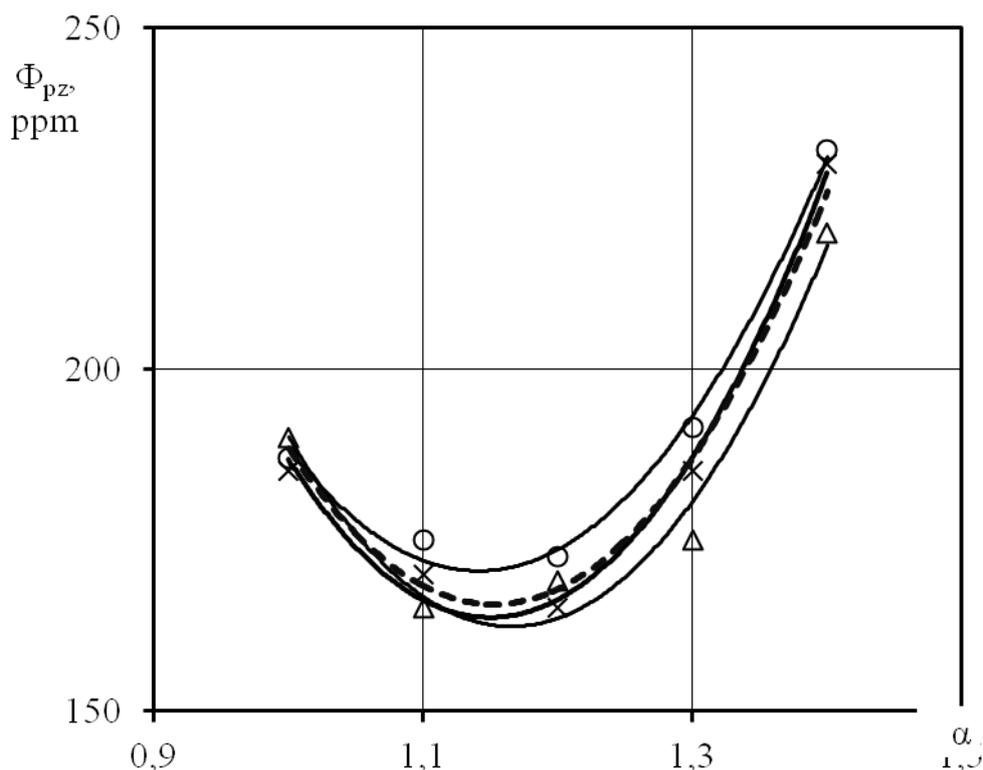


Рисунок 4.2 - Зависимость параметра  $\Phi_{pz}$  от состава ТВС:

○ –  $g_H=0\%$ ; × –  $g_H=3\%$ ; Δ –  $g_H=5\%$ ; ---- расчёт по(4.2)

Разработанный безразмерный обобщающий параметр  $\Phi_{pz}$ ,

связывающий концентрацию несгоревших углеводородов с максимальным давлением сгорания имеет хорошую сходимость с экспериментальными данными. Максимальное отклонение экспериментальных данных от расчётных составляет 5%.

Используя безразмерный комплекс  $\Phi_{pz}$ , можно определить концентрацию несгоревших СН при доводке существующих или вновь проектируемых ДВС, зная концентрацию несгоревших СН прототипа и разницу максимальных давлений у прототипа и создаваемого и вновь двигателя.

Например, в случае добавки водорода получим следующее выражение

$$C_{\text{CH}_4+\text{H}_2} = C_{\text{CH}_4} * [(P_z - A_i) / (P_{zH} - A_i)]^{2,5(gH/gC)} \quad (4.5)$$

Аналогично можно получить  $\Phi_{tpz}$ , используя результаты экспериментального исследования по определению времени достижения значения максимального давления сгорания, которые представлены на рисунке 3.2.2.

Таким образом, получен безразмерный комплекс зависимости концентрации НСН от максимального давления с учётом относительного содержания углерода и водорода в ТВС, который можно использовать в процессе проектирования или доводке ДВС.

#### **4.1 Методика для прогнозирования концентрации несгоревших углеводородов, предназначенная для стадий проектирования и доводки поршневых энергетических установок**

Практическое применение результатов исследования и предложенной эмпирической модели для оценки концентрации несгоревших углеводородов может быть выполнено при использовании разработанной методики, применяемой для бензоводородовоздушной смеси.

1. Принимаются для проектируемого ДВС основные параметры :  
обычно ограничиваются частотой вращения коленчатого вала ( $n$ ), полным объёмом размеров цилиндра ( $V_a$ ), степенью сжатия ( $\varepsilon$ ).

2. Принимаются значения величин углов опережения зажигания  $\theta_{o.z.}$  и диапазон изменения состава топливно-воздушной смеси,  $\alpha$ .

3. По результатам теплового расчёта (например, по методу И.И. Вибге) определяют значения максимального давления сгорания.

4. Рассчитывается безразмерный комплекс параметров по формуле

$$\Phi_{pz} = C_{снб} * [ (P_{zn} - A_i) / (P_z - A_i) ]^{2,5(gH/gc)},$$

Значения для бензовоздушной смеси выбираются по известным характеристикам прототипа вновь проектируемого двигателя

5. Согласно определённым предварительно значениям эмпирических коэффициентов  $A_i$  определяется концентрация НСН по формуле

$$C_{сн+н} = C_{снб} * [ (P_z - A_i) / (P_{zn} - A_i) ]^{2,5(gH/gc)}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили решить актуальную научно-техническую задачу, которая имеет существенное значение при проведении оценки и расчете концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах. При выполнении диссертационной работы получены следующие основные результаты и выводы:

1. На основании результатов экспериментального исследования проведён анализ характеристик сгорания для выбора определяющих параметров, влияющих на концентрацию несгоревших углеводородов в том числе и при добавлении водорода в бензовоздушную смесь.

2. Показано, что основную роль в величине концентрации несгоревших углеводородов при сгорании топливно-воздушной смеси в КС переменного объёма играет величина максимального давления сгорания и степень  $2,5(g_H/g_C)$  для учёта массового отношения содержания водорода и углерода в ТВС.

3. Предложена эмпирическая модель, оценивающая концентрацию несгоревших углеводородов в тепловых поршневых двигателях при добавках водорода с помощью разработанного обобщающего параметра

$$\Phi_{pz} = C_{снб} * [(P_{zn} - A_i) / (P_z - A_i)]^{2,5(g_H/g_C)}$$

4. Полученная эмпирическая модель на основе обобщающего параметра  $\Phi_{pz}$  позволяет оценивать концентрацию НСН в ОГ с учётом добавок водорода в ТВС при использовании полученной формулы

$$C_{сн+н} = C_{снб} * [(P_z - A_i) / (P_{zn} - A_i)]^{2,5(g_H/g_C)}$$

Использование в качестве определяющего параметра максимального давления сгорания позволяет рассчитывать концентрацию несгоревших углеводородов при тепловом расчёте, в котором эффективность рабочего процесса оценивается индикаторной диаграммой и, в конечном итоге максимальным давлением сгорания.

Основное преимущество предложенной модели заключается в значительном сокращении как финансовых, так и затрат времени при проектировании и доводке вновь создаваемых и существующих поршневых тепловых двигателей и установок с искровым зажиганием.

5. Предложенная эмпирическая модель позволила разработать методику оценки концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах, предназначенную для проведения расчётов в процессе проектирования и доводки поршневых тепловых двигателей и установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Семченко В.В. Влияние добавки водорода на токсичность и экономичность ДВС с искровым зажиганием (статья). Журнал: Инженер, технолог, рабочий №3(3, М, 2001 с.22...24).
2. 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
3. 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
4. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р. Расчёт концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах ДВС. Учебное пособие, Самара, 2014г.
5. Семченко В.В., Шайкин А.П., Влияние добавки водорода в топливно-воздушную смесь на максимальное давление сгорания (статья). Сборник трудов: IV Всероссийская научная конференция студентов, машистрантов, аспирантов., 2016г., Тольятти, с.401.
6. Шайкин А.П., Галиев И.Р. Влияние тепловыделения и формы камеры сгорания на концентрацию несгоревших углеводородов в отработавших газах. ВЕКТОР НАУКИ Тольяттинского государственного университета, 2016, №1. (35), с. 54-58
7. Будаев С.И., Ивашин П.В., Смоленский В.В., Шайкин А.П. Ионный ток в пламени и скорость сгорания топливно-воздушной смеси в двигателе с искровым зажиганием // Современные тенденции развития автомобиле

строения в России. Материалы 3-й ВНТК 26-28 мая, 2004г. ТГУ. - Тольятти:2004-С. 107-112

8. Будаев С.И., Ивашин П.В., Смоленский В.В., Шайкин А.П. Скорость распространения пламени и концентрация несгоревших углеводородов в бензиновом двигателе // Образование через науку. Материалы международного симпозиума МГТУ им. Н.Э. Баумана 17-19 мая 2005г. - М., 2005 - С. 391-392

9. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя - Москва-Свердловск, Машгиз, 1962.

10. Вибе И.И. Теория двигателей внутреннего сгорания // Конспект лекций. - Челябинск, 1974

11. Завадский Ю.В. Решение задач автомобильного транспорта методом имитационного моделирования. - М.: Транспорт, 1977

12. Ивашин П.В., Коломиец П.В., Смоленский В.В., Шайкин А.П. Контроль и регулирование процесса сгорания по ионному току в заключительной фазе сгорания // Материалы 4-ой ВНТК "Современные тенденции развития автомобилестроения в России", 26-28 мая, 2005г. ТГУ - Тольятти, 2005 - С. 55-58

13. Ивашин П.В., Прокопович Т.А., Шайкин А.П., Строганов В.И., Электропроводность пламени и средняя скорость сгорания в заключительной фазе/ Наука производству №4, 2004, с.5-7

14. Майоров Ф.В., Магнитострикционный метод и приборы для измерения давлений/ Труды ЦАГИ выпуск №445, 1939

15. Наканиши К., Разработка новой системы впуска для четырех клапанного двигателя, работающего на бедных смесях./ SAE. SP 1097, №95050, стр. 25-43, 1997.

16. Покровский Г.П. Электроника в системах топлива автомобильных двигателей. – М.: Машиностроение, 1990.

17. Смоленский В.В., Дягилева Н.М. Влияние физических параметров топливно-воздушной смеси в момент воспламенения на скорость

распространения пламени в основной фазе сгорания // Материалы МНК «Ломоносов», 12-15 апреля 2006, МГУ.-М., 2006. – С.97-99

18. Смоленский В.В., Ивагин П.В., Коломиец П.В., Шайкин А.П., Ахремочкин О.А., Особенности сгорания топливно-воздушной смеси при добавке водорода в поршневом ДВС // Материалы МНТК «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения», 26-28 апреля 2006 г. ЧТГУ. – Челябинск 2006. – С.106-111

19. Фристом Р.М., Вестенберг А.А. Структура пламени. – М., Металлургия, 1969

20. ХайкНадим. Возможность использования ионизационных датчиков в системах управления рабочим процессом ДВС. // Автореферат диссертации к.т.н. – Волгоград, 1991.

21. Шайкин А.П., Ахремочкин О.А., Гордеев В.Н., Ивагин П.В. Управление коэффициентом избытка воздуха ДВС с помощью тока ионизации. // МНПК Современные тенденции развития автомобилестроения в России. – Тольятти, 2003, с. 156-157.

22. Шайкин А.П., Ивагин П.В., Строганов В.И., Прокопович Т.А., Ионный ток в пламени и средняя скорость сгорания в заключительной фазе. // ВНТК Современные тенденции развития автомобилестроения в России. – Тольятти, 2004, с. 175-178.

23. Шайкин А.П., Ивагин П.В., Строганов В.И., Прокопович Т.А., Электропроводность пламени и средняя скорость сгорания в заключительной фазе./Наука производству, №4.-М., 2004, с.5-6.

24. Шайкин А.П., Русаков М.М., Бортников Л.Н., Пелипенко В.Н., Природоохранные проблемы автомобильных ДВС и Тепловых установок.// Юбилейная НТК – Тольятти, 1997, с. 46-47.

25. Шайкин А.П., Русаков М.М., Гордеев В.Н., Павлов Д.А. Исследования возможности дожигания токсичных составляющих в отработавших газах. // МНПК Прогресс транспортных средств и систем – Волгоград, 2002. С141-144.

26. Вестник Самарского аэрокосмического университета – Самара, 1999, с.144-148.
27. BP statistical review of world energy. – BP, 2014.
28. Галиев Р. С., Галиева С. А., Худобердиева Т. И. Особенности развития аллергической реакции в условиях воздействия выхлопных газов автотранспорта различной интенсивности // Экология человека. – 2007. – № 10. – С. 21-26.
29. Галиев Р. С., Галиева С. А., Тыртыгин В. Н. Воздух рабочей зоны водителя автомобиля как фактор риска развития аллергических заболеваний // Охрана труда. Практикум. – 2007. – № 8. – С. 93-102.
30. Annual energy outlook 2013. – Independent statistics & analysis, 2013.
31. Tyagi R. K., Ranjan R. Effect of hydrogen and gasoline fuel blend on the performance of SI engine // Journal of petroleum technology and alternative fuels. – 2013. - № 4 (7). – P. 125-130.
32. Бортников Л. Н. Особенности горения бензоводородовоздушной смеси в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания и определение оптимального соотношения бензин - водород // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 8-14.
33. Wang C. S. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignition gasoline engine at 800 rpm and lean conditions // Proceedings 18th world hydrogen energy conference 2010. – 2010. – P. 175-180.
34. Liberman M. Introduction to physics and chemistry of combustion. – Springer, 2008.
35. Воинов А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977.
36. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

37. Сабденов К. О., Долматов О. Ю., Юшицын К. В. К выяснению природы концентрационного предела горения // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – № 4. – С. 41-46.
38. Dunn-Rankin D. Lean combustion: technology and control. – Elsevier, 2008.
39. Коломиец П. В. Влияние скорости распространения пламени на выделения оксидов азота при добавке водорода в бензиновые двигатели: Дис. ... канд. тех. наук / Тольяттинский государственный университет. – Тольятти, 2007.
40. Ивашин П. В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока: Дис. ... канд. тех. наук / Тольяттинский государственный университет. – Тольятти, 2004.
41. Шайкин А. П., Ивашин П. В., Галиев И. Р. Влияние скорости распространения и ионизации пламени на концентрацию несгоревших углеводородов в газовом ДВС // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – № 4. – С. 248-252.
42. Автомобильные двигатели / под ред. М. С. Ховаха. – М. : Машиностроение, 1977. – 591 с.
43. Баринов В.В., Шайкина Н.А., Шайкин А.П., Переменный объем сгорания и его влияние на токсичность бензиновых двигателей при работе на бедной смеси (статья)// Известия Самарского НЦ РАН, специальный выпуск “ELPIT - 2007”, т.2
44. Бобровский И.Н., Ивашин П.В., Дурманова Н.А., Понизов 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

45. Броне, Д. Д. Сгорание в поршневых двигателях / Д. Д. Броне. – М. : Машиностроение, 1969. – 248 с.
46. Брызгалов, А. А. Добавка водорода в метановоздушную смесь газового двигателя / А. А. Брызгалов, А. П. Шайкин. – Тольятти, 2010.,
47. Буров, А. Л. Сгорание в поршневых двигателях : учебное пособие / А. Л. Буров. – М. : МГИУ, 2006. – 76 с
48. Быков, Г. А. Детонационные ограничения при использовании альтернативных топлив в двигателях с искровым зажиганием / Г. А. Быков // Экологические и ресурсосбережение. – 1995. – №3. - С. 3.
49. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г.Л. Агафонова под ред. П. А. Власова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
50. Варшавский, И. Л. Снижение токсичности ОГ бензинового двигателя применением добавок водорода / И. Л. Варшавский, А. И. Мищенко, А. И. Талда // Тезисы докладов на ВНК «Защита Воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами ТС». – 1977.,
51. Воинов, А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях / А. Н. Воинов. – М. : Машиностроение, 1977. – 277 с.
52. Гайнуллин, Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Гриценко. – М. : Недра, 1986. – 255 с.,
53. Галышев, Ю. В. Анализ перспективы создания водородных двигателей / Ю. В. Галышев //Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 2. – С. 19-23.
54. 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.,

55. Гутаревич, Ю. Ф. Снижение вредных выбросов автомобиля в эксплуатационных условиях / Ю. Ф. Гутаревич. – Киев : Выща шк., 1991. – 179 с.,
56. 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
57. Иноземцев, Н. В. Процессы сгорания в двигателях / Н. В. Иноземцев, В. К. Кошкин. – М. : Машгиз, 1949. – 344 с.
58. Иноземцев, Н. В. Процессы сгорания в двигателях / Н. В. Иноземцев, В. К. Кошкин. – М. : Машгиз, 1949, таблица 28.
59. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов / Р. З. Кавтарадзе. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с
60. Канило, П. М. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта / П. М. Канило, К. В. Костенко // Автомобильный транспорт. – 2008. – № 23. – С. 107 – 113.
61. Каштанов, Н. О Применении водорода в карбюраторных и дизельных двигателях / Н. О. Каштанов // Сборник научных трудов «Проблемы экономии топлива на автомобильном транспорте». – 1983
62. Лютко, В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В. Н. Луканин, А. С. Хачиян. – М. : МАДИ(ТУ), 2000. – 311 с
63. Луканин, В. Н. Экологическое воздействие автомобильных двигателей на окружающую среду / В. Н. Луканин, Ю. В. Трофименко // Итоги науки и техники. – 1993. – С. 11–36.,
64. 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.
65. 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
66. Морозов, К. А. Токсичность автомобильных двигателей / К. А. Морозов. – М. : Легион-Автодата, 2001. – 80 с.,
67. Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 154 с.,
68. 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.
69. 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.
70. Основы практической теории горения : учебное пособие / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др.; под ред. В. В. Померанцева. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 312 с
71. 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.
72. 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.
73. Семенов, Е. С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя / Е. С. Семенов, А. С. Соколик // Известия АН СССР. – 1958

74. Соколик, А. С. Основы теории процесса нормального сгорания в двигателях с искровым зажиганием / А. С. Соколик. – М. : АН СССР, 1951
75. Талантов, А. В. Основы теории горения / А. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1975. – 251 с
76. 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.
77. Хитрин, Л. Н. Физика горения и взрыва / Л. Н. Хитрин. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1957. – 443 с.