МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники (наименование института полностью) Кафедра «<u>Энергетические машины и системы управления»</u> (наименование кафедры) <u>13.04.03 «Энергетическое машиностроение»</u> (код и наименование направления подготовки) <u>Поршневые и комбинированные двигатели</u> (направленность (профиль)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Моделирование рабочего процесса в ДВС с искровым на тему зажиганием Студент В.А. Загоровский (И.О. Фамилия) (личная подпись) Научный В.В. Смоленский (И.О. Фамилия) (личная подпись) руководитель Консультанты В.В. Смоленский (И.О. Фамилия) (личная подпись) (И.О. Фамилия) (личная подпись) Руководитель программы д.т.н., проф. А.П. Шайкин (ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись) » июня 2017 г. ~ Допустить к защите Заведующий кафедрой к.т.н., Д.А. Павлов (ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись) « » июня 2017 г.

Тольятти 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение			
Глава 1 Обзор состояния вопроса по теме моделирования рабочего			
процесса в ДВС с искровым зажиганием 6			
1.1 Моделирования рабочего процесса в ДВС с искровым			
зажиганием	6		
1.2 Перевод иностранных источников по теме исследования			
1.2.1 Основы ионизации пламени	8		
1.2.2 Уточненное экспериментально соответствие характеристик			
пика ионизации и локальных характеристик давления при			
добавлении динамической модели NO	14		
1.2.3 Методы нейронной сети для контроля внутрицилиндровых			
процессов в двигателях внутреннего сгорания	25		
1.2.4 Модель для преобразования полученных сигналов в			
двигателе с искровым зажиганием в контуры пламени	31		
1.3 Постановка задач исследования	56		
Глава 2 Экспериментальное оборудование и погрешность			
экспериментов	57		
2.1 Экспериментальная установка УИТ – 85 57			
2.2 Оценка погрешностей измерений 58			
2.3 Выводы по второй главе 6.			
ГЛАВА З Результаты экспериментов и их анализ 64			
3.1 Результаты экспериментального исследования проведенного на			
УИТ-85	64		
3.2 Влияние добавки H ₂ в сжатый природный газ на концентрацию			
несгоревших углеводородов и угарного газа в отработавших газах			
ДВС с искровым зажиганием			
3.3 Скорость распространения пламени по фазам сгорания	73		
3.3.1 Средняя скорость распространения пламени в основной			

фазе сгорания	73
3.3.2 Средняя скорость распространения пламени в 1-ой фазе	
сгорания	75
3.4 Основные результаты измерений в экспериментальной установке	77
Глава 4 Обобщение выявленных особенностей процесса сгорания при	
добавке водорода в СПГ	78
4.1 Средняя скорость распространения фронта пламени СПГ с	
добавкой водорода в условиях КС поршневого ДВС	78
4.2 Определение характеристики тепловыделения	80
4.3 Возможность оценки интенсивности тепловых процессов в	
поршневых ДВС по характеру изменения показателя политропы	82
4.4 Основные выводы по анализу и обобщению основных	
результатов работы	85
Основные результаты и выводы	86
Список использованных источников	87

ВВЕДЕНИЕ

Создание моделей описывающих процесс сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием, позволяющих проводить моделирование рабочего процесса на стадии проектирования новых и перспективных видов двигателей, в том числе и на альтернативных видах топлива, является современной, значимой и актуальной задачей проводимых исследований.

В настоящее время идет активный поиск альтернативных видов топлив, к которым все больше относят смесевые топлива с добавкой водорода, позволяющей по новому организовать процесс сгорания и обеспечить значительное сокращение токсичных выбросов автомобильными двигателями при повышении эффективности процесса сгорания

Целью работы является моделирование рабочего процесса в ДВС с искровым зажигание для повышения эффективности новых ДВС на альтернативных видах топлива.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1) получение эмпирических зависимостей для определения скоростей распространения фронта пламени для углеводородных топлив различного состава;

2) уточнение коэффициентов с учетом скорости распространения пламени для характеристики тепловыделения по методике И.И. Вибе.

ОБЪЕКТ исследования – процесс сгорания углеводородных топлив в двигателях с искровым зажиганием.

ПРЕДМЕТ исследования – моделирование рабочего процесса, при изменении свойств ТВС за счет добавки водорода.

Методы исследования. Экспериментальные методы, со стендовыми испытаниями на одноцилиндровой установке УИТ-85, методы эмпирического анализа, статистическая обработка данных и компьютерное моделирование.

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

Научная новизна исследования

- 1. Установленные закономерности для определения средних скоростей распространения фронта пламени в 1-ой и основной фазах сгорания.
- Предложены уточнения (значения параметров m, φ_z) методики И. И. Вибе, позволяющие прогнозировать протекание процесса сгорания в зависимости от режимных параметров работы двигателя и свойств топлива.

Практическая значимость и реализация результатов. Полученные результаты позволяют проводить расчет процесса сгорания при работе на альтернативных видах топлива.

На защиту выносятся:

- 1. Эмпирические зависимости для расчета средних скоростей распространения фронта пламени.
- Эмпирические зависимости позволяющие определять коэффициенты характеристики тепловыделения по методике, предложенной И. И. Вибе, с учетом скорости распространения пламени в ДВС.

Апробация работы. Положения диссертации докладывались на научнотехнических семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» ТГУ в 2016 и 2017 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 печатных работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 44 наименований. Работа изложена на 91 странице текста, иллюстрированного 1 таблицей и 19 рисунками.

Глава 1 Обзор состояния вопроса по теме моделирования рабочего процесса в ДВС с искровым зажиганием

1.1 Моделирования рабочего процесса в ДВС с искровым зажиганием

В настоящее время еще не закончены поиски оптимальных моделей позволяющих проводить моделирование и расчет современных двигателей в том числе и с добавкой водорода в углеводородное топливо. Рассмотрим более подробно существующие модели и подходы для расчета рабочего процесса в ДВС.

Для расчета рабочего процесса в ДВС следует выбрать модель для определения условий подвода и отвода теплоты, т.е характеристики тепловыделения.

В настоящее время наибольшее распространение получила модель сгорания, предложенная И.И. Вибе, которая наиболее точно передает характер протекания реального процесса [9,23,27,30]. В методике Вибе, по сравнению с методикой Гриневецкого, учитывается не идеальность подвода теплоты и продолжительность процесса сгорания. В ней помимо значения коэффициента использования теплоты ξ_z , неизвестными остаются продолжительность сгорания φ_z и показатель характера сгорания *m*. Указанные параметры невозможно определить теоретическим путем, они могут быть получены после анализа экспериментальных данных. Поэтому можно сделать вывод, что методика теплового расчета И.И. Вибе применима для расчета, при условии известных параметров ξ_z , φ_z и *m*.

Простейший путь заключается во вводе в модель характеристик подвода теплоты от сгорания (кривой тепловыделения), полученной экспериментально, либо непосредственно в числовом виде, либо аппроксимированной некоторой функцией. Так, широкое признание получила формула И.И. Вибе [12, 13, 15]

$$\chi = 1 - e^{\ln(1 - \chi_Z) \left(\frac{\varphi}{\varphi_Z}\right)^{m+1}}, \qquad (1.1)$$

в которой форма кривой задается двумя параметрами m и φ_z . Достоинство этой формулы в близком соответствии формы кривой реальным характеристикам тепловыделения и возможности широкого ее варьирования за счет подбора параметров. Эта формула может применяться как к однозонной, так и к двухзонной или многозонной модели - различие лишь в том, к какому объему относится подвод теплоты.

Формула И.И. Вибе в зарубежных редакциях

$$\chi = 1 - e^{-a \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_{VO3}}{\varphi_Z}\right)^{m+1}}$$
(1.2)

Ларс Эриксон [26] предложил следующую методику определения неизвестных величин. (рисунок 1.1)

В результате оценки данных параметров получены следующие формулы для определения параметров входящих в формулу тепловыделения по Вибе:

$$m = \frac{\ln \frac{\ln 1 - 0.1}{\ln 1 - 0.85}}{\ln \Delta \theta_d - \ln \Delta \theta_d + \Delta \theta_b} - 1,$$
 (1.3)

$$a = -\ln 1 - 0.1 \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_d}^{m+1}, \qquad (1.4)$$

где:

 $\Delta \theta$ - продолжительность процесса сгорания

Δθ_d - продолжительность первой фазы сгорания- определяется по средней скорости в первой фазе сгорания (U₁ - Средняя скорость распространения

фронта пламени в первой фазе сгорания, т.е. от начала воспламенения до создания устойчивого фронта пламени - начала 2 фазы сгорания - $\Phi(10\%)$, $\Delta\theta_b$ - продолжительность основной фазы сгорания - определяется по средней скорости в основной фазе сгорания (U_{осн} - Средняя скорость распространения фронта пламени от начала воспламенения к удаленной части КС - $\Phi(85)$).



Рисунок 1.1 - Массовая доля сгоревшей ТВС по углу поворота коленчатого вала: $\Delta \theta_d$, - доля сгорания 10% ТВС - означает окончание первой фазы сгорания и начала фазы активного тепловыделения, и $\Delta \theta_b$ - доля сгорания 85% означает окончание второй фазы сгорания или фазы активного тепловыделения.

1.2 Перевод иностранных источников по теме исследования

1.2.1 Основы ионизации пламени

Свойства потока ионизации

Сгорание в двигателе обычно начинается с искрового разряда в свече зажигания. Пламя развивается и распространяется из местоположения свечи зажигания к цилиндрическим стенам, поскольку это потребляет воздушнотопливную смесь. Химические реакции и поднятая температура во фронте пламени производят свободные заряды через различные процессы ионизации. Количество свободных зарядов является маленьким, но измеримым (Reinmann, 1998). Применяя напряжение к промежутку искры после того, как искра исчезла, свободный заряд сформирует поток ионизации или поток иона. Технологию измерения потока ионизации называют смыслом иона. Иллюстрация 2.1 показывает символическую систему смысла иона. Сгорание производит свободный заряд, е⁻. Внешний кругооборот измерения обеспечивает напряжение измерения от конденсатора. Поток I потоков через кругооборот и текущее эквивалентное напряжение U-ion измерен по резистору R.

Поток ионизации имеет характерную форму. Одно предложение делит поток иона на три части, фазу воспламенения, фазу фронта пламени и фазу постпламени (Эрикссон и др., 1996; Нилсен и Эрикссон, 1998). Рисунок 2.2 показывает, что типичный след потока иона от топлива порта вводил двигатель с индуктивной системой воспламенения.

Фаза воспламенения начинается с заряда катушки зажигания и заканчивается катушкой, звонящей после искры. Передняя пламенем фаза отражает раннее развитие пламени в промежутке искры, и фаза постпламени появляется в сожженных газах позади фронта пламени.

Фаза воспламенения часто не учитывается в обсуждениях о потоках ионизации. Это оставляет текущую форму с типичными двумя пиками. Фаза фронта пламени часто упоминается сначала как пик или пик пламени. Фазу постпламени назвали вторым пиковым, тепловым пиком или пиком постпламени. Пик пламени был смоделирован, как произведение от ионизации в химических реакциях (Reinmann и др., 1997; Wilstermann, 1999).

Saitzkoff и др. (1996) сделал первый подход объяснения физики пика постпламени. Подход предлагает тепловую ионизацию азотной окиси как источник свободного заряда в камере сгорания, поэтому название тепловой пик. Тепловой пик также имеет сильную корреляцию в положении к цилиндрическому давлению (Эрикссон и др., 1996; Нилсен и Эрикссон, 1998). Эта собственность потока ионизации делает это интересным для использования в машинных системах управления для искры, рассчитывающей диагностику сгорания и контроль.

Существующие модели

Общее понимание - то, что взвешенный поток ионизации имеет его происхождение в тепловых и химических процессах ионизации, имеющих место в течение сгорания. Однако, несколько других процессов - активное воздействие на форму потока прежде, чем это измерено нашей эры конвертер. Свободное электрическое заряжение должно переместиться в электрическую область, вызванную электродами измерения и заставить электрический ток течь в кругообороте измерения. Электроны поглощены в положительном электроде и испускаются в отрицании. Ранее исследование представляет три различных модели, и они все основаны на различных предположениях об ограничивающем процессе в ионизации и кругообороте измерения. Следующие секции объясняют три модели с их принятиями на себя ответственности и, когда представлено ранее, их уравнениями.

Модель Saitzko -Reinmann

Модель для второго пика потока иона была представлена Saitzkoff и др. (1996). Рисунок 2.3 показывает идею модели. Форма цилиндра контролирует между двумя электродами свечи зажигания содержит свободные электроны от тепловой ионизации НЕТ. Электрическая область между электродами создает движение электронов. Движение свободных электронов доминирует над потоком, так как они очень мобильны по сравнению с положительными ионами. Процесс доминирования для того, чтобы производить свободные электроны - тепловая ионизация, и может быть описан уравнением Caxы (см. Saitzkoff и др. (1996) для предположений), который описывает баланс равновесия ионов и электронов для ионизации заказа _rst. Когда объединено с моделями для электронного дрейфа скоростная и электрическая область выражение для потока иона получено как (Saitzkoff и др., 1996)

Модель видит свободный космический заряд, который затрагивает электрическую область, произведенной свечой зажигания для измерения исследований. Движение заряда не изменяет область в камере сгорания значительно, так как перераспределенное заряжение - в такой низкой величине.

Движение однако измеримо во внешнем кругообороте. Главный предел для потока - доступ свободных электронов. Это - главное различие по сравнению с другими моделями.

Wilstermann (1999) представил подобную модель. Модель использует более детальные вычисления на электрической области и добавила химические реакции во фронте пламени как источник для свободного заряда.

Модель Calcote

Модель, представленная Calcote (1963) рассматривает физику электрода, когда электроны входят или оставляют электроды имеющего размеры кругооборота. Модель этого процесса использовалась Wilstermann (1999), чтобы объяснить возникновение потока ионизации в кругообороте измерения свечи зажигания.

Свеча зажигания смоделирована как исследование Langmuir. Центральный электрод имеет немного электрического потенциала (U_s) основанной части свечи зажигания. Камера сгорания содержит распределение частично ионизированных газов, где есть положительные и отрицательные ионы и освобождают электроны. В низком потенциале электрода центра движение частиц - во власти температуры. Предел для напряжения измерения, когда движение частицы становится во власти электрической области, не был представлен.

Если (U_s) будет достаточно отрицательный, то никакие электроны не достигнут поверхности электрода центра, так как все электроны будут отражены электрической областью. Положительные ионы будут привлечены на электрод и создадут поток. Когда (U_s) увеличивается к положительному, самые быстрые электроны начнут преодолевать электрическую область и достигать поверхности центра электрода. В некоторый момент, когда (U_s) все еще отрицательно, текущий вклад от электронов и положительных ионов равен, и чистый поток - ноль. Этот пункт называют Плавающим потенциалом. В (U_s = 0) электронный поток господствует над положительным ионом, текущим из-за более высокой подвижности и более высокой температуры.

Электрическая область вокруг электрода центра вызовет перераспределение заряда в камере сгорания. Противоположный заряд к (U_s), соберется вокруг электрода и устранит область в остальной части камеры сгорания. Для ($U_s > 0$), электронная концентрация (ne) вокруг электрода увеличится, как увеличится U_s. Поток тогда ограничен поверхностным процессом электрода. Поверхностный процесс в электродах может быть описан как, где все вхождения внесены в список в таблице 2.2. Первое уравнение действительно для электронов в положительном электроде, И второе действительно для положительных ионов в отрицательном электроде.

Как правило, системы измерения потока иона сегодня используют положительный потенциал электрода центра. Электронный поток В положительном электроде доминирует над общим количеством, текущим из-за более низкой массовой и более высокой температуры электронов по сравнению ионами. Как напряжение измерения (U_s) увеличения, электронная c концентрация вокруг электрода (ne) увеличивается и поэтому поток. Предположение здесь - то, что доступ свободных электронов в камере сгорания необходимого перераспределения. является достаточным ДЛЯ Никакое уравнение для отношения между (ne) и (U_s) не давалось.

Модель Yoshiyama-Tomita

Yoshiyama и др. (2000) представил теорию, основанную на ионизации фронта пламени. Эксперименты были сделаны в бомбе сгорания как в рисунке 2.4. Бомба сгорания имеет промежуток искры между двумя электродами, которые изолированы если бы не вершина, где искра запущена. Стена бомбы может быть электрически изолирована или связана с одним из электродов. Воздушно-топливная смесь была зажжена, и поток ионизации был измерен между электродами для различных электрических конфигураций стены палаты. Камера контролировала распространение пламени, И картины были синхронизированы со взвешенным потоком. Получающийся поток показывает два характерных пика, в некоторых случаях. Первый пик иона появляется, когда фронт пламени - близко к промежутку искры во всех испытаниях. Второй

пик появляется только для случая, когда стена связана с отрицательным электродом и когда фронт пламени достигает стены. В ходе экспериментов были сделаны два вывода:

- Форма потока ионизации зависит из положения пламени и полярности электрода.

- Ионы и электроны произведены во фронте пламени химическими реакциями, и тепловая ионизация незначительна.

Представленная теория объясняет следствия заставленных экспериментов. Однако, условия в экспериментах, давление начала 4 брусков и температуры начала 290 К, могут привести к тому, что предложенная тепловая ионизация не будет иметь место из-за низкой температуры. Формирование NO также будет намного меньше чем для экспериментов, сделанных Saitzkoff и др. (1996).

Другие наблюдения

Эксперименты на двигателях, используя различные типы свечей зажигания показывают сильную зависимость геометрии во взвешенном потоке ионизации. Следующие выводы были сделаны:

1. Больший электрод центра увеличивает амплитуду теплового пика. Этот факт поддерживает все три теории.

2. Больший электрод основания увеличивает амплитуду пика пламени. Это поддержано и моделями Yoshiyama-Tomita и Calcote. Модель Saitzkoff-Reinmann не включает фазу фронта пламени.

3. Форма пика пламени зависит от формы электрода основания. Это также поддержано и моделями Yoshiyama-Tomita и Calcote.

4. Форма теплового пика зависит от поставки электронов от легко ионизированных разновидностей как NO и щелочных металлов. Этот факт объясняется моделью Saitzkoff-Reinmann, но другие две модели также действительны.

Результаты и итоговые выводы

Три модели имеют различные представления потока иона, производящего процесс в цилиндре и измеряющего кругооборот. Рисунок 2.5 показывает три главных процесса, которые рассматривают в моделях.

Модель Reinmann предполагает, что поток обнаружен в имеющем размеры кругообороте, если заряд перемещается в электрическую область в цилиндре (обработайте 1). Заряд не должно быть в контакте с электродами.

Модель Calcote полагает, что переход газового электрода и процесс перемещения заряда самый важный. Это означает, что заряд должен достигнуть, электрод, чтобы сделать текущее обнаружимое (обрабатывает 2 и 3). Модель Calcote также заявляет, что поток в этих двух электродах не должен быть равен. Самый активный заряд, электрон, доминирует над потоком иона.

Модель Yoshiyama и Tomita утверждает, что поток в этих двух электродах должен быть одинаковый, так как поток, кажется, ограничен более медленными положительными ионами во фронте пламени (обрабатывает 2 и 3).

Эти три процесса отличны, но не обязательно исключая друг друга. Они могут сосуществовать в некотором смысле. Однако, три модели имеют различную интерпретацию потока ионизации в смысле параметров сгорания. Поскольку пример - второй пик потока ионизации, настоятельно связанного с цилиндрическим пиком давления в модели Saitzkoff-Reinmann, но для Yoshiyama-Tomita модель, это подразумевает, что фронт пламени имеет его максимальную область контакта к стенам палаты. Это - не та же самая вещь. Чтобы исследовать эту идею далее, необходимо знать, как кругооборот измерения работает, но это исследование оставлено для будущей работы.

1.2.2 Уточненное экспериментально соответствие характеристик пика ионизации и локальных характеристик давления при добавлении динамической модели NO

Аннотация

Моделирование двигателей внутреннего сгорания - важный инструмент в машинном исследовании. Развитие и моделирование потока ионизации имеют потенциал в развитии действительных датчиков давления, основанных на размерах ионизации. Предыдущие модели имеют проблему, предсказывая истинные отношения между местоположением пика давления и местоположением пика ионизации, и ранние и поздние предсказания были соблюдены. Объяснение этих несоответствий обеспечивается, и модель, где экспериментальные данные не сочетаются, был уменьшена и автоматизирована, также представлена.

Введение

Моделирование двигателей внутреннего сгорания - важный инструмент в научных исследованиях новых машинных. С увеличивающейся вместимостью компьютера это будет в будущем быть возможным сделать оперативные находящиеся внутри автомобиля моделирования сгорания. Учитывая хорошие модели, это обеспечит машинным системам управления полезную информацию. Рассмотрение времени должно было получить хорошие модели, это важно для уже, теперь развивают их.

Почему делают Модели Сгорания?

Самые простые развитые модели рассматривают целый цилиндр как одна нульмерная зона. Нульмерный означает, что нет никаких пространственных изменений в пределах зоны. В моделях одной зоны это означает, что температура и давление однородны всюду по цилиндру. Более передовая модель - нульмерная модель с двумя зонами, где мы имеем сожженный тот и одну несожженную зону. Здесь каждая зона имеет ее собственный температурный и химический состав, и давление однородно в целом цилиндре.

Чтобы оценивать тепловые усилия на машинных частях и вычислять число ионизированных частиц, более высокое решение температурных градиентов в пределах цилиндра необходимо. Чтобы получить это, теоретическая мультизональная нульмерная модель была развита в Системе Vehicular, ISY, Офсетном [8].

Один простой способ контролировать сгорание онлайн - ощущение потока ионизации. Это сделано, применяя напряжение поперек свечи зажигания и измерения потока, который течет через. В-цилиндре свободные ионы и их электроны проведут поток. Моделируя поток ионизации, и сравнивая это с экспериментами, физика позади, это еще полностью не понято, может быть показано. То, когда это сделано, машинные системы управления могут использовать реальное время, измерило поток ионизации, чтобы управлять двигателем, например, предсказание положения пика давления.

Текущая ситуация с моделированием

Начиная воздействовать на этот тезис были некоторые задачи иметь дело. Первыми были результаты Ingemar Andersson, сделал всего lic, [2]. Эти результаты показали, что моделируемый поток ионизации пиковое положение был расположен приблизительно 2 CAD1 позже чем взвешенное пиковое положение. В его моделированиях он не использовал никакого вида теплопередачи, massflow между зонами или мультизональной моделью. Результат Андерссона может быть замечен в иллюстрации 1.1.

Вторыми были результаты Карл-ЙоханНодженмира, сделал в его тезисе владельца [9]. В моделированиях Нодженмира поток ионизации пиковые положения был расположен приблизительно 4 автоматизированного проектирования ранее чем взвешенное пиковое положение. Нодженмир использовал различные модели теплопередачи и мультизональную модель сгорания. Он также включал massflow между зонами. В рисунке 1.2 три моделирования с различными моделями теплопередачи сделаны.

Теория

Эта глава разделена на четыре части. Первая часть - краткое введение в четырехтактный двигатель Отто. Часть два имеет дело с одной из нескольких моделей, описывающих сгорание/сжатие в цилиндре. Две последних части о моделях потока ионизации и без моделей, соответственно.

Короткий Четырехтактный двигатель Отто Энгин

Понятия

Двигатель Отто четырехтактного двигателя машина, которая преобразовывает химическую энергию в топливе в механическую энергию и высокую температуру. Поскольку название подразумевает, что это работает в четырех стадиях, видеть рисунок 2.1. В первой стадии (а) поршень перемещается вниз, поскольку клапан впуска открыт. Топливо, типично воздух смешался с бензином, потоки в цилиндр из-за различия давления в коллекторе потребления и цилиндре, вызванном движением поршня. Когда поршень достигает его более низкого поворотного момента завершения клапана потребления, и поскольку поршень продвигается (b), это сжимает топливо. Когда это достигает определенного пункта, (угол воспламенения) перед его верхним поворотным моментом, электрический кругооборот создает искру в промежутке между свечами зажигания два электрода. Это начинает сгорание. В то время как сгорание происходит поршневые повороты в его верхнем поворотном моменте. В течение фазы расширения поршневые шаги вниз (с) и часть внутренней энергии воспламененного газа преобразован к механической энергии. Когда поршень достигает его более низкого поворотного момента, выпускной клапан открывается и поскольку поршень продвигается (d), теперь воспламененный газ вытекает в выхлопной трубе.

Моделируя двигатель Отто, много уравнений написаны как функция положения кривошип. Самое общее примечание - угол между кривошипом и осью цилиндра, видеть иллюстрацию 2.2.

Модели Сгорания/Сжатия

Там существует несколько моделей сгорания/сжатия. Используемый тот объясняется в этой секции.

В течение моделирования, цилиндр разделен на произвольное число зон. Сначала, в течение сжатия, есть только одна несожженная зона. Поскольку сгорание начинается, новая маленькая сожженная зона создана, и массовый поток от несожженной зоны до сожженной зоны установлен. То, когда зона достигает, определенная масса ограничивают ее массовый поток, отключено, и новая маленькая зона создана между двумя зонами. Массовый поток от

несожженной зоны продолжает течь, но теперь в новую зону. То, когда эта новая зона достигает, масса ограничивают ее массовый поток, также отключено, и новая зона создана. Этот процесс продолжается, пока вся масса в несожженной зоне не потребляется. Массовый поток между несожженным и сожженная зона определен экспериментальной функцией Vibe:

Это решает, что массовая фракция сожгла xb, отношение между сожженной массой, МБ и полной массой mtot, как функция угла кривошипа Каждый должен вычислить, мгновенные жгут норму областью пламени времен скорости пламени, видят [10, 11].

Происхождение многозонных моделей сгорания

Как сказано прежде, чем в-цилиндре давление, как предполагают, является пространственно инвариантным. Какие остатки быть уникальным для зон являются их температурами, объемами и химическим составом. Два предположения сделаны. _ реакции в сожженной зоне достаточно быстры, быть приближен как в равновесии.

Реакции в несожженной зоне достаточно медленны, быть приближен как заморожено.

Первое отношение, которое будет удовлетворено - уравнение баланса для объемов:

где dVi - изменение объема для зоны я, и dV - изменение объема для целой системы, типично из-за движения поршня. Для каждой зоны идеальный газовый закон, объем плазмы = mRT, должен быть удовлетворен, в дифференцированной форме:

Уравнение сохранения энергии, которое будет удовлетворено для всех зон:

Когда уравнение (2.5) решено для дуплекса, каждый получает изменение в системе как функция существующего государства. Этим числовой интегратор может вычислить следующее государство. Более детальное исследование вычислений было сделано Eriksson [3].

Подписать Температуру Сожженной Зоны

Когда новая сожженная зона создана, это должно иметь правильную начальную температуру, Tbi. Эта температура может быть найдена, решая то есть теплосодержание для воспламененной массы, жесткая костная чернь - то же самое как теплосодержание для невоспламененной массы, hu. В яванском выполнении эти теплосодержания сведены в таблицу в столе, произведенном с CHEPP [4]. Детальное описание доступно в [3].

Теплопередача

Так как есть температурное различие, Т, между в-цилиндре газом и цилиндрическими стенами, мы включили поток энергии. Согласно закону Ньютона охлаждения, высокая температура, переданная через область контакта газового баллона в единицу времени:

Модели Потока ионизации

Поскольку сгорание происходит, часть азота в воздухе окислена в NO, типично приблизительно один процент. Из-за высокой температуры в пределах цилиндра это NO тепло ионизировано в NO⁺. Присутствие этих ионов и их свободных электронов может быть обнаружено, применяя напряжение поперек электродов свечи зажигания. Технология и теория для этой темы были развиты в Системах Vehicular последние годы, и несколько публикаций были написаны. Детальное исследование исследования было соединено Andersson [2].

Поток, который течет через свечу зажигания, имеет характерную форму в области времени, с одним пиком вокруг TDC2, и одного пика 10 - 15 автоматизированного проектирования после TDC. Второй пик может быть вызван ионизированным NO, и это имеет также сильную корреляцию к цилиндрическому пику давления. Это делает поток ионизации интересной собственностью для оперативного сгорания, когда цилиндрическое давление непосредственно не измерено.

Модель Saitzkoff-Reinmann

Saitzkoff и др. [1] сделал подход, основанный на тепловой ионизации NO, объяснять второй пик. Цилиндр форменный объем контроля помещен между электродами свечи зажигания, видят рисунок 2.4. Так как электрическая

область является самой сильной здесь, ионы и свободные электроны в этом цилиндре сделают главный вклад в проводимость. Свободные электроны очень мобильны по сравнению с ионами, и они доминируют над потоком. Saha поднял уравнение для тепло произведенных свободных электронов (см. [1] для предположений), который описывает баланс иона и электронной концентрации, когда сначала заказывают ионизацию, рассматривается:

Это уравнение, объединенное с электронной скоростью дрейфа дает поток I, когда напряжение U применено:

Модель Calcote

Эта модель была представлена к 1963 Calcote. В модели Calcote свеча зажигания смоделирована как исследование Langmuir. Центральный электрод имеет немного электрического потенциала, Нас родственник основанные части свечи зажигания. В камере сгорания есть смесь ионизированных газов, включая положительные и отрицательные ионы и свободные электроны. Если электрический потенциал Нас будет достаточно отрицателен, то все электроны будут отражены электрической областью. Только положительные ионы произведут немного потока. Если Нас увеличиваются к положительному, что самые быстрые электроны начнут преодолевать электрическую область и производить немного потока.

Первое уравнение действительно для электронов в положительном электроде, и второе действительно для положительных ионов в отрицательном электроде.

Модель Yoshiyama-Tomita

Теория основана на ионизации фронта пламени. Эксперименты были сделаны в бомбе сгорания. Стена бомбы сгорания может быть электрически изолирована или связана с одним из электродов. Результат показывает характерным пикам потока ионизации. Первый пик появляется, когда фронт пламени - близко к промежутку искры. Второй пик только появляется, когда стена бомбы связана с отрицательным электродом, и когда фронт пламени достигает стены. Два вывода были сделаны от экспериментов:

- Форма потока ионизации зависит из положения пламени и полярности электрода.

- Ионы и электроны произведены во фронте пламени химическими реакциями, и тепловая ионизация незначительна.

Более обширное объяснение модели Calcote и Yoshiyama-Tomita модель может быть найдено в [2].

Есть множество способов вычислить без концентрации. Это - тема следующей секции.

Направить Экспериментальное Сравнение

Новое Сравнение Тех же самых Данных

Узнавать, является ли приспособление между моделируемым и взвешенным давлением чувствительной частью в модели, новое сравнение было сделано. Используемыми данными было то же самое как Карл-Джохан Нодженмир, используемый в [9]. Приспособление было сделано, регулируя остаточную газовую фракцию, xres, продолжительность сгорания, в уравнении (2.1) и начальной температуре, Tivc. Параметры были приспособлены до моделируемых и взвешенных кривых давления, переданных настолько хороший насколько возможно. Чтобы вычислять начальную температуру, Tivc, уравнение (4.1) использовалось. 1350 - заключительная температура от типичного машинного цикла, и 300 - приблизительная разнообразная температура:

Рисунок 4.1 показывает моделируемую кривую давления, подготовленную со взвешенным давлением. Кривые соответствуют весьма хорошо, если бы не амплитуда.

В таблице 4.1 средняя ценность и стандартное отклонение положения пиков ионизации от моделирования представлены. Это может быть замечено в таблице 4.1, что новые результаты моделирования и старое почти идентичны. Это означает, что модель не особенно чувствительна в приспособлении давления. Может также видеться, что стандартные отклонения во взвешенных данных являются весьма большими.

Это происходит из-за большого цикла к изменениям цикла и даже потому что данные являются весьма шумными. Для каждого угла воспламенения, 0 восемь различных циклов давления были приспособлены и затем моделировались. Эти восемь циклов были выбраны как восемь циклов, где возникновение времени пика давления было самое близкое к срединному возникновению времени пика давления.

Рисунок 4.2 показывает заговор взвешенных и моделируемых средних ценностей и стандартных отклонений для каждого угла воспламенения. Длина линий - одно стандартное отклонение с середины линии, была средняя ценность, расположен. Горизонтальные линии соответствуют взвешенным ценностям, И вертикальным линиям К моделируемым ценностям. Горизонтальные линии равны, потому что те же самые данные использовались в обоих моделированиях. В рисунке 4.3 данные из таблицы 4.1 использовались, чтобы создать приближение наименьшего квадрата. Для каждого моделирования прямая линия была оснащена взвешенными средними ценностями как функция моделируемых средних ценностей.

Распространение Сравнения с Большим количеством Данных

К даже больше устраняют возможности, что причины назначений параметра, что моделируемый пик ионизации - несколько автоматизированного проектирования рано, сравнение большего количества данных, были сделаны. Моделирования были сделаны с четырьмя различными ценностями лямбды, и по сравнению с передачей измерил данные и представлены в таблице 4.2.

Результаты Анализа Чувствительности

Последний шаг в первой части - анализ чувствительности. Здесь все моделирование и машинные параметры увеличены и уменьшены на десять процентов. Поскольку каждым набором параметра моделирование управляли. Если моделирование не сходилось, изменение параметра было уменьшено к одному проценту.

Результаты представлены в таблицах 4.3, 4.4, 4.5 и 4.6. Ценности, представленные в столе рассчитаны первым взятием расстояния между пиком

давления и пиком ионизации без любого изменения параметра. Тогда расстояние между пиком давления и пиком ионизации в данных моделирования с изменением параметра было рассчитано. Эти две ценности тогда вычтены друг из друга. Как может быть замечен в таблице 4.3 и 4.4, все ценности находятся под половиной степени. Это означает, что маленькое изменение параметра имеет небольшое влияние на результат. И даже в таблице 4.5 и 4.6 ценности являются маленькими, если бы не s и E. Но изменение одного процента в этих параметрах не является реалистическим, потому что s и E параметры преобразованы ко времени моделирования. Тогда увеличение на один процент или уменьшение той ценности времени становятся очень большими.

В таблицах 4.7 и 4.8 дается короткое объяснение всех параметров, используемых в анализе чувствительности.

Сравнение с Другими Моделями

В рисунке 4.7 различие между моделируемым пиковым местоположением с теплопередачей и без теплопередачи, может быть замечен. Когда Андерссон сделал его моделирования, он не включал теплопередачу. Пик потока ионизации расположен приблизительно 2 автоматизированного проектирования Ho позже чем взвешенное. включением теплопередачи пиковое 4 местоположение перемещено К положению автоматизированного проектирования ранее чем взвешенный пик.

Заключения

Заключения

Цель этого тезиса состояла в том, чтобы дать ответ на три пункта, заявленные во введении.

1. Делая моделирования с мультизональным, статический NO и моделью теплопередачи, наблюдение, что моделируемый поток ионизации пиковое местоположение всегда является несколькими автоматизированным проектированием ранее чем взвешенный пик, кажется, правильное. Повторение моделирований, которые Карл-Джохан Нодженмир сделал в его тезисе,

приводит почти к тем же самым местоположениям пика ионизации. Это означает, что модель не очень чувствительна в двух, отличных вручную сделанные приспособления кривой давления. Приспособления были также расширены с большим количеством данных, но результаты показали даже здесь, что поток ионизации пиковое местоположение был приблизительно 2 - 4 проектирования Наконец автоматизированного к рано. анализ чувствительности показал, что почти все параметры не имели ни одного или очень маленького влияния на результаты. В рисунке 5.1 кривая потока ионизации была подготовлена для одного цикла в определенном рабочем Кривая. соответствующая всему ЭТОМУ выше - отмеченная пункте. Теплопередача кривой - геометрия. Может ясно видеться, что моделируемая кривая расположена несколько автоматизированного проектирования к рано. И даже другие модели теплопередачи использовались, и результаты были подготовлены в рисунке 5.1.

2. Объяснение различия между результатами Карл-Джохана Нодженмира и Инджемара Андерссона состоит в том, что Нодженмир включал теплопередачу в его модель, которую Андерссон не сделал. Эта теплопередача делает пик потока ионизации, перемещающийся 8 автоматизированного проектирования ранее. В модели Нодженмира там также включен massflow между зонами. Но этот massflow имеет очень небольшое влияние на пиковое местоположение.

Это может быть замечено в рисунке 4.9. Другое объяснение мультизональная модель. В рисунке 4.8, может видеться, что моделирования, сделанные только с одной сожженной зоной отличаются весьма очень от моделирований, сделанных с большим количеством зон. Это переместило бы пиковое местоположение приблизительно 2 автоматизированного проектирования позже чем Андерссон, который использовал только одну сожженную зону.

3. После выполнения динамического без модели, моделируемый и взвешенный поток ионизации пиковые местоположения - в пределах 1

автоматизированного проектирования. Результат - в пределах края ошибки. Попытка достигать лучшего соглашения не уместна, из-за шума во взвешенных данных. Рисунок 5.1 показывает кривую потока ионизации, используя динамический без модели.

1.2.3 Методы нейронной сети для контроля внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания

Аннотация

Машинные изготовители постоянно стремятся находить новые и улучшенные методы для контроля и контроль двигателей автомашины. Цель состоит в том, чтобы достигнуть уменьшенной выхлопной эмиссии и превосходящей топливной экономики. Методы интеллектуальных систем, типа нейронных сетей и нечетких методов, являются привлекательными для заявления в этой области из-за их способностей в распознавании образов, моделируя и контроле. Поэтому использование нейронных сетей в контроле и контроле двигателей автомашины становится областью исследования, которое получает увеличивающееся внимание и от академических и от коммерческих сообществ исследования. Эта бумага рассматривает путь, которым нейронные сети могут быть применены к бензину или двигателям автомашины воспламенения искры для контроля сгорания, бортовой диагностики и увеличивали стратегии контроля. Это также описывает исследование в этих областях, выполняемых в Зарубежном Центре Автомобильного Исследования в Университете Брайтона.

Введение

Есть две текущих темы в области проекта двигателя автомашины, питают экономику и сокращение вредной выхлопной эмиссии. Европа, Соединенные Штаты, и большая часть остальной части мира, имеет законодательные средства управления, которые управляют допустимыми уровнями загрязнителей в выхлопе Внутреннего Сгорания (ВС) двигатели [1].

Поддержание этих стандартов в текущих двигателях требует строгий контроль эксплуатационных параметров, используя Машинные Системы Управления на основе микропроцессора (Европейская валютная система (EBC)) или Машинный Блок управления (МБУ).

Европейская валютная система (ЕВС) осуществляет стратегии контроля, которые стремятся достигать оптимальной эффективности и высокой выходной мощности когда требуется, в то же самое время поддерживая низкие уровни эмиссии. В то же самое время, в бензине или двигателе воспламенения искры, Европейская валютная система (EBC) должна использовать двигатель в области, благоприятной действию каталитического конвертера с тремя путями, который далее уменьшает вредное содержание выхлопа. Двигатель должен также показать хороший переходный ответ и другие особенности, желательные моторных изготовителей оператору, известному среди как общая характеристика управляемости автомобиля, в ответ на движения главного контроля водителя, душения или педали акселератора. Европейская валютная система (ЕВС) управляет, количество топлива признавалось в двигателе (ширина топливного пульса), пункт в цикле, в котором смесь зажжена (выбор времени воспламенения), количество выхлопного газа повторно циркулировало (EGR), и другие параметры в передовых машинных проектах, например, выборах времени клапана. Это выбирает ценности для этих параметров от взвешенных количеств типа скорости, вращающего момента груза, расхода массы воздуха, вставлял разнообразное давление воздуха, температуры в различных пунктах, и душить угол.

Европейская валютная система (EBC) имеет дальнейшую роль, в том законодательстве в США и теперь в Европе требует бортовую диагностическую систему (БДС). Система БДС должна указать, когда эмиссия не соответствует стандартам, или когда условия ошибки происходят, который мог привести к чрезмерной эмиссии.

Исследование имеет место, чтобы развить улучшенный машинный контроль, включая нейронные сети и другие методы интеллектуальных систем

в Европейскую валютную систему (EBC). Вклад нейронной сети может быть категоризирован в три области, которые исследуются в этом статье:

• Нейронные сети имеют роль в интерпретации данных от датчиков, уже представляют в двигателе, или доступный по низкой дополнительной стоимости, чтобы извлечь новую информацию. Пример этого - сгорание, контролирующее использование свечи зажигания, которая описана позже.

• Нейронные сети может использоваться для обнаружения определенных подписей от новых или существующих датчиков в системах БДС, чтобы обнаружить и идентифицировать условия ошибки.

• Нейронные сети, и связанная технология, нечеткие системы, может быть ценен в выполнении передовых стратегий контроля.

Сгорание, Контролирующее использование Свечи зажигания

Использование свечи зажигания как датчик сгорания в бензине или воспламенении искры (ВИ) двигатели кажется привлекательным когда по сравнению с другими сенсорными методами. Много методов, типа размеров давления или легкой регистрации эмиссии оптикой волокна, требуют, чтобы камера сгорания была изменена, и это может самостоятельно затронуть сгорание. Во-вторых, двигатели - чрезвычайно ценовые чувствительные и дополнительные датчики, можно только обеспечить, если они являются экономически могущими быть оправданным в терминах усовершенствований, они обеспечивают.

Свеча зажигания уже присутствует в двигателе бензина, устраняя потребность сделать любые потенциально вредные модификации к головке цилиндра или камере сгорания и избегая дополнительных затрат. Поскольку свеча зажигания находится в прямом контакте со сгоранием, это - превосходный свидетель к процессу сгорания. Анализ бывшего инициатором напряжение и текущие формы волны поэтому потенциально обеспечивает здравый и дешевый метод для того, чтобы контролировать явления в камере сгорания.

Метод использования свечи зажигания как датчик сгорания, который получил большинство внимания, известен как ионический Текущий метод. Это было исследовано для того, чтобы измерить давление сгорания топлива и обнаружение условий ошибки типа осечки и пробивания искры.

Альтернативный метод, в настоящее время исследуемы, называют Напряжением Искры Characterisation, который вовлекает анализ нейронной сети переменной временем формы волны напряжения искры. Текущее исследование вовлекает использование нейронных сетей, чтобы предсказать AFR с обещанием результатов, и возможности использования для обнаружения ошибки сгорания.

Ионические Контрольные Системы Потока

В ионной текущей системе, свеча зажигания используется как датчик в течение не стреляющей части цикла. Это сделано, применяя маленькое напряжение уклона приблизительно 100 вт к свече зажигания и измеряя поток. Этот поток происходит из-за реактивных ионов в пламени, которые проводят поток поперек промежутка, когда напряжение применено. Ионы сформированы в течение и после сгорания, и тип и количество подарка ионов зависят от особенностей сгорания. Поток ионизации также зависит от давления, температура и т.д. и поэтому богат информацией, но очень сложный [2].

Ионная-текущая форма волны имеет три известных пика. Первое происходит из-за пульса воспламенения. Второе - прохождение фронта пламени через промежуток. Третье, названное почтовое пламя, корреляты с давлением сигнализируют, и используется для искры, рассчитывающей контроль и газовое ощущение температуры вокруг промежутка искры [3]. Много работы было сделано на использовании ионных потоков для того, чтобы контролировать сгорание, главным образом оценивать давление сгорания, и таким образом действовать как замена для датчиков давления сгорания. Системы потока иона были также предложены для АСУ и рассчитывающей воспламенение оценки, и осечки и стучащего обнаружения [4, 5]. Позже,

нейронные сети были применены к анализу ионных-текущих данных для контроля прогресса искры и АСУ оценки [6,7].

Ионный-текущий метод кажется привлекательным, потому что только незначительные модификации обязаны приспосабливать двигатель. Однако, диоды высокого напряжения или другие методы переключения необходимы, чтобы изолировать ионную-текущую схему от системы воспламенения, и они были склонные к отказу в прошлом. 100V электропитание - также дополнительный компонент, который требуется, и стоимость любого дополнительного компонента должна быть тщательно оправдана.

Напряжение Искры Characterisation, использующий Нейронные сети

Метод

Напряжение Искры Characterisation (НИС) - сгорание, контролирующее технику, которая предлагает альтернативу ионному-текущему методу. Используя свечу зажигания как датчик сгорания, эта техника имеет многие из преимуществ ионного текущего метода. Однако, поскольку метод вовлекает анализ формы волны напряжения воспламенения непосредственно, это устраняет потребность в дополнительном электропитании уклона, и в связанном высоком напряжении, переключающем схему.

ТСАК занят в исследовании напряжения характеристики искры как метод для контроля сгорания, например для определения топливно-воздушного отношения. Точное измерение желательно, но не в настоящее время достижимо в двигателях производства из-за высокой стоимости датчиков. Дешевый точный метод определения АСУ в цилиндре имел бы большое обращение к автомобильной промышленности. Метод также мог потенциально быть расширен на измерение в-цилиндре давления.

Метод СДСАСУ оценки вовлекает использование нейронной сети, чтобы связать переменную временем форму волны напряжения в свече зажигания с АСУ, измеренным анализатором выхлопного газа.

Результаты

Используя мультицилиндр машинный и случайный захват формы волны искры находилось, что нейронная сеть может дифференцироваться между различными категориями воздушно-топливного отношения (отношение лямбды = 1.0, 1.2 или 1.4 соответственно) с нормой успеха приблизительно до 90 %, обеспеченных груз, скорость и т.д., считались постоянным [8].

Последующая работа, используя маленькую полную единственную цилиндрическую буровую установку испытания, упомянутую выше, показала, что было возможно изменить к лучшему это, и получить нормы классификации приблизительно 95 %, снова с другими параметрами, проведенными постоянными [9, 10]. Эффекты изменений в скорости были также исследованы. Практическая АСС система должна быть в состоянии обеспечить точные диапазону условий скорости. Повышения размеры ПО груза И экспериментальных средствах обслуживания предназначены, чтобы позволить исследование и усовершенствования этой области. Экспериментальные результаты, используя новую систему синхронизации, описанную выше, будут предоставлены позже.

Заключение

Внутренний двигатель внутреннего сгорания, вероятно, будет самой общей электростанцией автомашины до хорошо в двадцать первое столетие, хотя новые варианты типа Бензина Прямая Инъекция (GDI) и Высокая скорость Прямая Инъекция (HSDI) двигатели Дизеля могут вытеснить более обычные машинные варианты. Машинные проектировщики и изготовители устанавливаются честолюбивые цели для топливной экономики и выхлопной эмиссии. Чтобы встречать эти цели, режимы контроля, осуществленные Европейской валютной системой (EMS) должны будут увеличиться в изощренности. Нейронные сети и другие методы интеллектуальных систем могут быть полезно применены к анализу сенсорных данных. Они могут также быть полезны в достижении нелинейных картографий, необходимых для эффективного машинного моделирования и контроля. В бензине или двигателях воспламенения искры, анализ нейронной сети данных, полученных

от свечи зажигания обещает быть мощной техникой для дешевого контроля сгорания и обнаружения ошибки в системах OBD.



Рисунок 1.5 - Интеллектуальная Машинная Система Управления

1.2.4 Модель для преобразования полученных сигналов в двигателе с искровым зажиганием в контуры пламени

A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours		
Abstract.	Аннотация.	
A model, which converts flame	Модель, которая преобразовывает	
arrival times at a head gasket ionization	время движения пламени при	
probe, used in a spark-ignition engine,	исследовании ионизации в	
into flame contours has been	"уплотнении" головке поршня, для	
developed. The head gasket was	двигателя с воспламенением от искры, в	
manufactured at MIT using printed	пламя с его последующим развитием.	
circuit board techniques. It has eight	Главный уплотнитель был изготовлен в	
electrodes symmetrically spaced	МІТ, используя печатную модель	
around the circumference (top of	(штамп). Он имеет восемь электродов,	
cylinder liner) and it replaces the	симметрично расположенных по	
conventional head gasket. The model is	окружности (вершина прокладки	

based on engine flame propagation data taken from the literature. Data from optical studies of S.I. engine combustion or studies utilizing optical fiber or ionization probe diagnostics were analized in terms of the apparent flame speed and the entrainment speed (flame speed relative to the fluid ahead of the flame). This gives a scaling relationship between the flame speed and the mass fraction burned which is independent generic and of the chamber shape.

Experiments were run to check the accuracy of the model's predictions at 18 different operating conditions, including variations of equivalence ratio, engine speed, and flowfield inside the combustion chamber. Measurements of flame arrival time at three intermediate points between the spark plug and the liner with ionization probes and optical fibers were used to check the model predictions. The overall agreement between the model experiments and the good. was Calculations were also done using a thermodynamic burn rate analysis which gave the mass fraction of the mixture burned at a given time. These

обычный цилиндра), И ОН заменяет уплотнитель. Модель базируется на данных распространения пламени В двигателе. взятых ИЗ литературы. Данные полученные оптическими изучений(измерениями) сгорания для двигателей с ИЗ или (измерениями, использующих оптическое волокно или диагностику исследования ионизации с точки зрения очевидной скорости пламени и скорости сноса (скорость пламени относительно жидкости перед пламенем). Это масштаб дает отношения между скоростью пламени и сожженной массовой долей смеси. общим который является И независимым от формы КС.

Эксперименты проводились, для того чтобы проверить точность результатов полученных у модели в 18 различных эксплуатационных режимах, включая изменения эквивалентности соотношений. оборотов числа двигателя, и поля течения в камере сгорания. Измерения времени прибытия пламени в трех промежуточных точках между очагом искры и прокладкой были получены, используя датчик ионизации И оптическими волокнами, чтобы проверить результаты полученные y were compared to mass fraction burned predictions based on the modelgenerated flame contours and good agreement was obtained.

Introduction.

Diagnostics play an important role in research internal combustion on engines. The ionization probe is one of the tools that offers valuable information about the charge burnup process. This is currently of prime importance as much effort is being spent on extending the operating limits of SI engines to regions where flame development and propagation is marginal.

The ionizing properties of flames and the response of ionization probes have been known for a long time [1]* (*Numbers in parentheses designate references at end of paper.). Recently, reliable and non intrusive ionization probe circuits have been developed [23,4], where a printed circuit on a circuit board material replaces the conventional head gasket However, the flame arrival times obtained by an ionization probe at the end of the flame travel process are not easily related to flame contours because of a varying

Было модели. получено хорошее совпадение результатов полученных в экспериментах и моделью. Вычисления были проведены, используя термодинамический анализ нормы {разряда} горения, который дал массовую долю смеси, сожженной в установленный срок. Их сравнили с массовой долей смеси которая должна была сгореть исходя из предположений, полученных при моделировании контуров пламени, и было получено хорошее совпадение(соглашение).

Введение.

Диагностика играет важную роль в исследовании двигателей внутреннего Исследование сгорания. ионизации является одним ИЗ инструментов дающим ценную информацию о расходе TBC В процессе сгорания. Это В настоящее время имеет первостепенное значение так как значительные усилия тратятся расширенный рабочих на возможностей лвигателей ИЗ R области где возникновение И распространения пламени предельное(краевое).

Ионизирующие свойства пламени и реакция на ионизацию исследовались и были известны в течение долгого

flame propagation speed. The purpose of this paper is to present a model which uses the flame arrival times at a set of points on the cylinder liner to calculate the flame evolution contours for the given engine cycle.

MODELING THE FLAME EVOLUTION INSIDE THE CYLINDER.

To draw the flame contours at any given time we have to know how the flame evolves from the point of ignition both in space and time. A model had to be developed that would give the general scaling law for the flame speed or the distance traveled by the flame at any time after ignition. The different approaches to modeling flame propagation in the cylinder of an S I engine were recently reviewed in [6]. The modeling approach followed in this work is one which assumes that the flame propagation speed has a given functional form for a given engine. The absolute value of the speed is allowed to vary but the way it scales during the flame propagation process does not change. We have adopted the above modeling approach for two reasons: Firstly, the data obtained from the

времени [1]. Недавно был разработан, надежный И не сложный ионизационный зонд [23,4], который показывает круговорот в вещества монтажной плате заменяющей обычную прокладку головки. Тем не менее, время прибытия получаемое пламени ионизационным зондом, В конечном счете, не легко связать с контуром пламени, потому что пламя распространяется переменной С скоростью. Цель этой работы состоит в чтобы том, представить модель, которая, используя время прибытия определенные пламени В точки расположенные на прокладке (втулке) цилиндра, могла вычислять контуры распространения пламени для данного повторяющегося цикла.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПЛАМЕНИ В ЦИЛИНДРЕ.

Для того чтобы очертить контуры пламени в любой момент времени мы должны знать, как пламя развивается из точки, где началось зажигание В Модель пространстве времени. И должна разрабатываться так, что бы давать общий масштабный закон для скорости пламени или расстояние, которое пройдет это пламя в любой

literature were easily interpretable in terms of the model, facilitating the analysis. Secondly, this approach requires no further assumptions about the turbulent flame propagation physics.

MODEL DESCRIPTION

Data from the literature displaying the results of photographic studies of combustion in transparent engines or studies utilizing diagnostics like the ones used here (optical fibers or ionization probes) were used as the basis of the model. Note that ionization probes give flame front arrival times at a specific point, in space whereas optical fibers give the location of the leading edge of the enflamed volume in some plane normal to their line of sight, i.e. there is no information about the distance of the flame from the optical fiber windows along its line of sight.

The data available were for three different engines each operated under a variety of different conditions. The first was a Volkswagen engine with a Heron combustion chamber, run at 3000 rpm and relative air/reel ratios of 1 and 1.3 [7]. The second was an optical access момент после зажигания. Другой метод для моделирования распространения пламени в цилиндре для двигателей с ИЗ был недавно рассмотрен в [6]. Метод моделирования, рассмотренный в этой работе, особенность одну имеет скорость распространения пламени имеет данную функциональную форму данного двигателя. Абсолютная ЛЛЯ величина скорости может изменятся но расстояние пройденный пламенем должен оставаться постоянным. Мы приняли этот выше указанный метод моделирования по двум причинам: Вополученные первых, данные ИЗ литературы были легко интерпретированы(поддающиеся толкованию) с точки зрения модели,

облегчая анализ. Во-вторых, этот метод не требует никакие дальнейшие предположения о физики процесса распространения турбулентного пламени.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Данные из литературы, отображающей результаты фотографических исследований горения в прозрачных двигателях или исследованиях, использовавших диагностику подобно той, которая использовалась здесь engine run at 600 and 1200 rpm at relative air/fuel ratios of 1.1 and 1.4 [8]. The third engine was again an optical access engine run at 300 rpm with a stoichiometric mixture [9].

It was decided to obtain the flame evolution curve for the above engines, and hence for any engine, by expressing it in the following form:

> () (1)

$$\frac{t}{t} = f(\frac{t}{t_0})$$

i.e., the distance traveled by the flame in any direction normalized by a known distance Ro is given by a function of the time to travel there normalized by the time to, taken to travel to Ro. As we show later, this way of specifying the distance traveled by the flame at a given time is equivalent to specifying the normalized speed of the flame (for the whole of burn duration).

Thus the data for the three different engines were plotted and fitted in the form of equation (1) where f(t/to) is a polynomial of order 5 in (t/to) for each engine. The reference radius Ro was taken to be about in the middle of the distance traveled (25 mm), is order to allow more data to be include in the (оптические волокна или ионизационные зонды (датчики)), были использованы в качестве основы для Обратите модели. внимание, что латчики ионизации лают времена прибытия фронта пламени В определенной точке, в месте, тогда как оптические волокна дают местоположение ведущего края фронта некоторой плоскости пламени В нормально к плоскости наблюдения, то никакой информации есть, нет 0 расстоянии пламени от оптических окон волокна до его видимой линии.

Данные были доступны OT трех различных двигателей, каждый ИЗ которых работал при различных Первым был условиях. лвигатель Фольксвагена с камерой сгорания Цапли, работающий при 3000 об/мин и относительном коэффициенте избытка воздуха α 1 и 1.3 [7]. Второй был двигатель с оптическим управлением, работающим при 600 и 1200 оборотов в относительном минуту при коэффициенте избытка воздуха α 1.1 и 1.4 [8]. Третий двигатель был снова с оптическим управлением, работал при 300 оборотов В минуту co стехиометрической смесью [9].
plots. Note that for the same engine, data in different directions were treated separately but then plotted on the same graph, for example as in Fig.4. This reinforces the assumption that the flame speed is influenced temporally by the changing conditions in the cylinder which are approximately the same for all of the unburned gas. The function f is fitted for every engine as a fifth order polynomial.

Differentiation of the above expression yields the apparent flame speed U:

$$\frac{U}{r_o} = f\left(\frac{t}{t_o}\right)$$

$$U\frac{t_o}{r_o} = g\left(\frac{t}{t_o}\right)$$
(2)

where in obtaining the second equation we used the fact f(t/to) is a polynomial. Eliminating the time from the above two equations allows us to determine how the apparent flame speed varies during burn duration.

$$U\frac{t_{e}}{r_{e}} = h(\frac{r}{r_{e}}) \tag{3}$$

This was done by plotting equation (1) versus equation (2) treating time as a parameter) and fitting the resulting curve as a fifth order polynomial.

This shows that requiring the distance

Было решено получить кривую развития пламени для вышеупомянутых двигателей, и следовательно для любого двигателя, выраженную в следующей форме:

$$\frac{r}{r_0} = f(\frac{t}{t_0}) \qquad (1)$$

пройденное расстояние, то есть, B любом направлении, пламенем нормализованное кизвестным расстоянием Ro, дает функцию времени, для того чтобы перемещение было нормализовано по времени, для того чтобы взять перемещение Ro. Как мы показали в дальнейшем этот метод определяет расстояние пройденное пламенем в данное время эквивалентно определенной (полученной)

нормализованной скорости пламени(для всего процесса сгорания).

Таким образом, данные ДЛЯ трех различных двигателей были подготовлены и приспособлены в виде уравнения (1), где f (t/to) - полином 5 порядка от (t/to) для каждого двигателя. Рекомендованный радиус Ro был взят так, чтобы находится ПО середине пройденного расстояния (25 мм), это позволило дополнить данные график. Обратите включенные В

flame traveled by the to follow equation (1) is equivalent to requiring the normalized flame that speed profiles (as a function of radius) be the same in all the directions although the magnitude of the speed may vary. In other words the scaling relation obeyed by the flame speed during the flame propagation process is fixed for every engine. Specifying the flame arrival time fixes the absolute magnitude of the speed as a function of radius. Equations (1) and (3) allow the flame speed as a function of time to be calculated once it is known as a function of radius.

The normalized distances traveled as a function of time for the three different engines considered are plotted in Fig.5. We can see that the flame propagation curves for the three different engines are not the same. Although the phasing of the flame propagation is similar in most engines (to obtain the best compromise between fuel efficiency, emissions, and bmep) the normalized speed varies. This was attributed to the different geometrical characteristics of the engine cylinder. taking By the

внимание, что самого для того же двигателя, данные различных В направлениях рассматривали отдельно, но затем они достраивались на уже имеющийся график, как, например на Рис. 4. Это усиливает предположение, что на скорость пламени оказывает временное влияние изменение состояния в цилиндре, которые приблизительно те же самые что и для не сожженного газа в целом. Функция f приспособлена для каждого двигателя как полином пятый порядка.

Дифференцирование выше указанного выражения дает явную скорость пламени U:

$$\frac{U}{r_o} = f'(\frac{t}{t_o})$$

$$\frac{U}{r_o} = g(\frac{t}{t_o})$$
(2)

где в полученном втором уравнении, мы использовали фактически полином f(t/to). Устранение времени из второго уравнения позволяет определить как фактически изменяется скорость пламени в течении процесса сгорания.

Это был сделан посредством вычерчивания уравнения (1) против

(3)

 $U\frac{r_0}{r_0} = h(\frac{r}{r_0})$

geometrical characteristics of every engine into account we expect to arrive to a more general scaling relation (for a quantity related to the flame speed) that holds for every engine. From that relation we could construct the (scaled) flame evolution curve for any engine given its geometrical characteristics. The flame contours can then be drawn given the flame arrival times, as explained above.

Following Beretta et.al. [10] we define the flame as the region delimited bv: The flame front where the conditions of flame propagation are met and hence the exothermic reaction is advancing, the flame back where the burning process is completed, and the quench areas when the flame cannot sustain itself because of high heat losses due to contact with the chamber walls, Fig.6. The enflamed region is defined as the region behind the flame front. The non-enflamed region is the region that has had no contact with the flame front to the time in question.

The average flame speed over the whole front is defined as:

(4) P-14 ndA

уравнения (2) (рассматривающего время как параметр) и приспосабливая(монтируя)

результирующую кривую как полином пятого порядка(пятый член полинома).

Это требовать показывает, что расстояние, пройденное пламенем, что следует из уравнения (1) эквивалентно требованию, чтобы нормализовать скорость фронта пламени (как функцию радиуса), существует то же во всех направлениях хотя величина скорости может изменяться. Другими словами масштаб отношения подчиняется изменению скорости пламени в течении процесса распространение пламени установленного для каждого двигателя. Определение времени прибытия пламени устанавливает абсолютную функцию величину скорости как радиуса. Уравнения (1) и (3) допускают скорость пламени как функцию времени, для того чтобы вычислять по известной функции радиуса.

Нормализованные расстояния перемещения как функции от времени для трех различных двигателей, представлены на Рис. 5. Мы можем видеть, как распространение кривой фронта пламени для трех разных Using a similar definition we can define the (average) gas speed ahead of the flame front Ugf. Then the average speed at which mixture is entrained into the flame is given by:

 $u_t = u_t - u_{tr}$

In their work, Blizard and Keck [11] and Beretta et al [12] suggested that Ue remains constant during the cycle. More extensive studies by McCuiston et al. [13], Hires et al. [14] and Tabaczynski et al. [15] suggested that Ue varies as a function of the unburned gas density which is a function of the in-cylinder conditions. We argue that since the phasing of the burn event is similar in many spark-ignition engines we can find a way to scale the entainment speed against a suitably normalized time. The entrainment speed is also known in the literature as the turbulent flame speed. There have been many attempts to relate it to the laminar burning speed and the local turbulence intensity. Examples can be found in flame speed models [16,17] and recent reviews [18,19].

A control volume analysis [10] gives the well known result (neglecting

двигателей - не одно и тоже(различно). Хотя фазирование распространения пламени аналогично В большинстве двигателей (чтобы получить лучший компромисс между расходом топлива, (5) токсичностью, мощностью), И нормализованная скорость различная. Это было приписано различным геометрическим

характеристикам(свойствам) цилиндра двигателя. Беря геометрические характеристики каждого двигателя в расчет, мы предполагаем, что появятся новые лополнительные обшие масштабные отношения(они должны быть количественно связанными CO скоростью пламени) которая определяется для каждого двигателя. Для этого отношения мы можем создать (масштаб) кривую развития(распространения) пламени для любого двигателя, по его геометрическим характеристикам. Контуры пламени могут затем быть получены по данным времени прибытия пламени, как объяснено выше.

Следуя за et.al Beretta. [10] мы определяем пламя как область ограниченная фронтом пламени где условия распространения пламени piston motion) that:

 $U = \left[\frac{\rho_*}{\rho_*}(I - y_*) + y_*\right]\mu_*$

where Ue is the entrainment speed, Yb is the volume fraction burned and Pu and P β are the unburned and burned densities, respectively. The gas entrainment speed is the speed with which the flame advances relative to the unburned gas ahead of it. The volume fraction burned can be calculated as a function of r/r0 for any combustion chamber geometry. In order for the above calculation to yield a result depending on r only we had to assume that the flame propagates spherically from the point of ignition. Introducing more parameters would not increase the accuracy of the calculations in a significant way. By using the fact that pu/pb = 4 we can calculate how the ratio U/Ue, varies as a function of rlr0:

(6)

 $\frac{U}{w} = w(\frac{r}{v})$ Equation (7) is a polynomial fit of order 3. A higher order fit was not necessary since the curve is very smooth (an example is given in Pig. 7.) Using equations (6) and (7) we obtain:

следовательно выполнены И экзотермическая реакция продвигается, пламя возвращается туда где горение завершается и гасится в области где пламя не может поддерживаться непосредственно из-за большой потери тепла благодаря контакту со стенками камеры, рисунок 6. Послепламенная область определена как область позади фронта Вне-пламенная пламени. область - область, которая не имела никакого контакта с фронтом пламени к рассматриваемому времени.

Средняя скорость пламени через движение фронта определена как:

Используя аналогичное определение, ΜЫ можем определить, среднюю скорость газа впереди фронта пламени Ugf. Тогда средняя скорость, с которой пламя движется относительно смеси, определена как:

Ue = Ue - Ue

(5)

В своих работах Blizard и Keck [11] и Beretta et al. [12] предложил, что Ue остается постоянной в течение всего Более расширенных цикла. исследованиях McCuiston et al. [13],

(7)

 $u_0 \frac{t_0}{r_0} = \hbar (\frac{r}{r_0}) / w(\frac{r}{r_0})$ (8) This implies that the normalized entrainment speed is a function of the radius of the flame and hence the mass fraction enflamed Xf:

 $u_{*}\frac{t_{o}}{r_{*}}=q(x_{i})$

.

(9)

Turbulent flames have a complex internal structure [20,21] and may contain pockets of unburnt gas. As demonstrated by Beretta et at. [10] the mass fraction burned is almost always less than (or at most equal to) the mass fraction enflamed. This is a result of the definition of the flame front, since it takes a finite time for the charge to burn after it has been entrained [11,15]. If we can assume that the effect of this burn up time is small or that it has an almost similar effect in all engines, then we get:

$$u_{e}\frac{t_{o}}{r_{o}}=q(x_{s})$$

where Xb is the mass fraction burned. Thus starting from an equation of the form of equation (1) for every engine, we can get an expression for the variation of the entrainment speed as a Прокат et al. [14] и Tabaczynski et al. [15] Ue что изменяется как функция несгоревшей плотности газа (концентрации ТВС), которая является функцией условий в цилиндре. Мы утверждаем, что поскольку фазирование горения случайно, аналогично BO многих двигателях с ИЗ, мы можем найти способ измерить "относительную" скорость "относительно" "по" нормализованному Относительная времени. скорость должна быть известна из литературы как турбулентная скорость пламени. Было много попыток связать это с ламинарной скоростью горения И местной интенсивностью турбулентности. Примеры могут быть найдены в моделях скорости пламени [16,17] и недавних обзорах [18,19].

es, Анализ управления объема [10] дает хорошо известный результат (пренебрегающий движением поршня) (10) что:



где Ue – относительная скорость, Yb сгоревшая доля объема и Pu и Pβ – плотность не сожженных и сожженных function of the mass fraction burned, for the given engine.

The results of the above analysis are plotted in Fig.8 (see also appendix). We can see that there is good agreement between the data from the three engines. The physical basis of this modeling approach is that, since the phasing of the burn event is similar for most engines we expect the normalized entrainment speed to be similar for most engines. Thus we can use his scaling relationship and integrate it to produce the equivalent of equation (1) for each specific engine (in our engine the Hydra MK III). The integration constant can be determined by the fact that for t/t0,r/r0 has to be 1, by definition.

The above analysis gives as the behavior of the flame in the direction of maximum flame travel. In combustion chambers in which the spark plug is not located in the middle of the chamber the flame reaches the wall at different times. In that case we assume that the flame follows the above speed profile until it comes close to the wall. The speed is then made to go to zero in a manner resembling the

соответственно. Относительная газов. скорость является скоростью, с которой пламя продвигается вперед относительно сожженного не газа Сожженная доля объема может быть рассчитана как функция r/r0 для любой геометрии камеры сгорания. Для того чтобы эти вычисления давали результат в зависимости от r, мы должны были предположить, что пламя распространяется сферически от точки воспламенения. Введение нового параметра не увеличило бы точность вычислений существенным способом. Используя то, что ри/рb = 4 мы можем вычислить, как отношение U/Ue. изменяется как функция r/r0:

$$\frac{U}{\mu_e} = w(\frac{r}{r_o}) \tag{7}$$

Уравнение (7) – является полиномом 3 порядка. Более высокий порядок не был нужен поскольку кривая очень гладкая (пример дается на рисунок 7) Использование уравнений (6) и (7) мы получаем:

$$He \frac{t_o}{r_o} = h(\frac{r}{r_o}) / W(\frac{r}{r_o})$$
(8)

Это подразумевает что, нормализованная относительная final flame stow down period in Fig. 8. The distance from the wall at which this happens again follows the final flow down period as shown in Fig.9.

In calculating the enflamed volume as a function of the radius in equation (7) we have made the assumption that the flame grows at a sphere from the ignition point. The flame does not necessarily propagate as a sphere (as we have eight different arrival times in the eight different direction in general). If we need to take deviation from this behavior into account for the calculation of equation (7) we can do that by defining an equivalent spherical flame front being fit to the enflamed volume at any time and defining the radius as an equivalent radius of a sphere having the same volume as the enflamed volume. This will introduce minor changes to the above mentioned calculations (see This later). approximation becomes very good when the model is used to generate average flame contours over a large number of cycles where the resulting average contours it very smooth and almost spherical.

The scaling relation of Fig. 8 along

скорость является функцией радиуса пламени и следовательно массовой доля несгоревшей смеси Xf:

$$u_{\bullet} \frac{t_{\bullet}}{r_{\bullet}} = q(x_{f}) \tag{9}$$

Турбулентное пламя имеет сложную внутреннюю структуру [20,21] и может содержать карманы не сожженного газа. Как продемонстрировал Beretta et al. [10] массовая доля сожженной смеси почти всегда меньше чем (или самое большее равняться) массовой доли не сожженной TBC поступившей в цилиндр. Это - результат определения фронта пламени, поскольку потребуется конечное время для того чтобы сжечь заряд который поступил в КС как это было определено в [11,15]. Если мы можем допустить что эффект этого горения по времени - небольшой или, что у него есть почти аналогичный эффект во всех двигателях, тогда мы получаем:

$$u_{\sigma}\frac{t_{\sigma}}{r_{\sigma}}=q(x_{\sigma}) \tag{10}$$

где Xb - массовая доля сгоревшего топлива. Таким образом начиная с уравнения формы уравнения (1) для каждого двигателя, мы можем получить

with about the information the geometrical shape of an engine's combustion chamber can be used to produce the flame evolution curve of the given engine. This was done for the Ricardo Hydra engine and the results are shown in Fig. 10. Using this we can produce the flame contours (given eight, arrival times) as follows: The distance of each ionization probe from the spark plug is known and so we know the time the flame has arrived at a particular place, the probe location. Given an Ro (in our case 25 mm) we can then solve for the time the flame was 25 mm away from the spark plug. So, we can solve for Ro, the only unknown, at any given time. Thus from eight arrival times, we obtain eight flame front locations for the same time. These are then smoothly connected by a spline fit to produce the flame contour.

VERIFICATION EXPERIMENTS

METHOD: The experimental set up used to check the accuracy of the flame contour predictions of the model was explained previously. The extra ionization and optical probes installed in the cylinder head give the arrival выражение для изменения относительной скорости как функция массовой доли сгоревшего топлива, для данного двигателя.

Результаты вышеупомянутого анализа 8 показаны рисунке (см. на приложения). Мы можем видеть, что есть хорошее соглашение между данными ОТ этих трех двигателей. Физическая основа этого метода моделирования в том, что с тех пор как фазирование горения случайное аналогичное большинства для двигателей, ΜЫ ожидаем, что относительная нормализованная скорость будет аналогичной для большинства двигателей. Таким образом, мы можем использовать его масштабирование отношения и внедрять это. чтобы производить эквивалент уравнения (1) для каждого специфического двигателя (в нашем двигателе Гидра МК Ш). Интеграция констант может быть определена фактом, что для t/t0, r/r0 должен быть 1, по определению.

Вышеупомянутый анализ дает как поведение пламени в направлении максимального перемещения пламени. В камерах сгорания, в которых свеча times of the flame at intermediate points in the combustion chamber. Experiments were carried out for a variety of equivalence ratios and flowfields (see Table 1). Note. however, that the model gives the flame radius along the eight lines connecting the spark plug to the eight ionization probes (called lines of propagation). The extra ionization probes are located close to the cylinder head so they detect the flame arrival close to the wall. In general, this is at a different time than the arrival time at a point at the same distance from the spade but along the lines of propagation. Had we tried to estimate when the flame would arrive at the extra probe location we would have bad to make an explicit assumption about the effect of the flame slowing down close to the wall. This effect is a result of two phenomena: Firstly quenching at the wall is significant so the flame speed will be slower close to cylinder head. Secondly the gas speed is smaller close to the wall because of the boundary layer. These two effects result in the flame front close the wall 'lagging behind' the rest of the flame

зажигания не расположена в середине камеры сгорания, пламя достигает стены в разное время. В том случае мы предполагаем, что пламя следует за вышеупомянутым профилем скорости, пока он не прибывает близко к стене. Скорость затем падает до нуля в момент прекращения горения как показано на рисунке 8. Расстояние от стены, у которой, это случается снова, следует за заключительным потоком вниз период как показано в рисунке 9.

В вычислении не сгоревшего объема как функции радиуса в уравнении (7) мы сделали предположение, что пламя растет в сферу от точки воспламенения. Пламя не обязательно распространяется в виде сферы (так как мы имеем восемь различных времен прибытия в восьми различных направлениях). Если МЫ отклонение должны учесть ЭТО В поведения при вычисление уравнения (7), мы можем сделать это, определяя эквивалентный сферический фронт приспосабливая пламени, его к несгоревшему объему в любое время и определяя радиус как эквивалентный радиус сферы, имеющей тот же самый объем что и у сгоревшего вещества. Это внесло незначительные изменения В

RESULTS: Figures 11 and 12 show the physical location of the extra probes (dotted lines) as compared to the predictions of the model at the time the flame arrived at the probe. In order to account for the difference in height between the line of propagation and the location of the probe on the cylinder head, the flame was taken to have a constant radius in the vertical direction at that point in time. As we can see there is some deviation. This has to be explained by the above arguments retarding flame lagging near the wall, since Fig. 12 shows that the optical probe which reports the position of the leading edge of the front (and hence is uninfluenced by the flame lagging close to the wall) is in good agreement with the model. Figure 13 shows that the correction required because of this flame lagging scales with the distance of the cylinder head probe from the line of flame propagation.

Another point has to be taken in account. The flame arrival times taken

выше упомянутые вычисления (см. позже). При ЭТОМ приближение становится очень хорошим, если модель использует усредненные контуры большого пламени, полученные ИЗ числа повторяющихся циклов, при этом результирующий усредненный контур получается очень гладким И почти сферическим.

Масштабирование отношения на рис. 8 наряду С информацией 0 геометрической форме камеры сгорания двигателя может использоваться, чтобы построить кривую развития пламени данного двигателя. Это было сделано двигателя Ricardo Hydra, для И 10. результаты показаны на рис. Используя это мы можем построить контуры пламени (которые дали восемь времен прибытия) следующим образом: расстояние каждого ионизационного датчика от свечи зажигания известно, поэтому мы знаем время, когда пламя достигло конкретного(установленного) места, местоположения датчика. Задаваясь Ro (в нашем случае 25 мм) мы можем находить время, за которое пламя удалилось от свечи зажигания на 25 мм. Так что мы можем решать для Ro, единственной неизвестной, в любой at the head gasket ionization probe are averaged over ensembles of 300-350 cycles. Since the flame is a wrinkled thin reaction sheet, the arrival times obtained correspond not to the leading edge of the flame front but to a contour between the average flame front and the average flame back. Hence the measured arrival of the flame front is slightly later than an arrival time based on the flame's leading edge. As a result the model gives the position of this average contour rather than the leading edge. This has been taken into account when drawing the flame contours for the optical data. Best agreement with the experimental results was obtained when a flame brush half-thickness of 2-3 mm was assumed and the reduction in arrival time because of that was accounted for. In addition, the 10 degree conical angle field of view of the optical probes was taken into account. This required correction of about 1 mm.

The results were also examined on a cycle-by-cycle basis. The approach was the same; the predicted location plotted at the time of flame arrival at the test probe. This time however, a frequency

момент времени. Таким образом имея восемь времен прибытия мы получили восемь положений фронта пламени в течение того же самого времени. Эти точки затем связываются гладкими линиями (сплайном), чтобы очертить контуры пламени.

ПРОВЕРКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

Метол: Ранее была проведена экспериментальная проверка точности прогнозируемого контура пламени полученного с использование модели. Дополнительные ионизационные И оптические датчики, установленные в голове цилиндра дают время прибытия пламени промежуточных В точках камеры сгорания. Эксперименты были выполнены при различных коэффициентах эквивалентности и полях течения (смотри Таблицу 1). Тем не менее имейте в виду что модель дает радиус пламени вдоль восьми линий соединяющих свечу зажигания И ионизационные (названные датчики распространения). линиями Дополнительные ионизационные датчики расположены близко к голове цилиндра, так что они фиксируют время прибытия пламени близко у стенок. Вообще то это другое время, чем время

48

plot was obtained for all of the 350 cycles. Figure 14 shows an example of the results obtained. The frequency plot shows that the predicted locations are distributed around the average location used in the results discussed above. The spread is well within the limits of cycle to cycle variation and there is nothing to suggest then the model is not applicable for plotting of single cycle contours.

An additional test for the model would be to check how its predictions of the flame contours vary with engine operating conditions. For example, the standard deviation in the contours should increase when the air/fuel ratio becomes leaner. Figure 15 demonstrates this effect. Figure 16 shows the rotation of the flow pattern when the flow in the cylinder is made swirling.

We have also checked whether the mass faction burned as predicted by the enflamed volume was consistent between the different cases, and if it agreed with a separate thermodynamic analysis of the pressure trace, done using a one-zone pressure trace analysis model [22]. The calculation of

прибытия в этой точке полученное по линии распространения. Если бы мы пробовали оценить, когда пламя лостигнет местоположения дополнительного датчика, мы бы имели плохой результат, чтобы это сделать мы должны эффект учесть гашения пламени при приближении в стенкам цилиндра. Этот эффект является результатом двух явлений: Во-первых, гашение у стен значительно, так как скорость пламени значительно уменьшается приближении при к стенкам цилиндра. Во-вторых, скорость газа является меньше близко у стенки из-за граничного слоя. Эти два эффекта результате фронт дают В пламени "происходит меньше стенок V задержка", чем в остальных частях фронта пламени. Поскольку мы не смоделировали эффекты, ЭТИ полученные данные объяснены ниже без коррекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Рисунки 11 И 12 физическую показывают позицию дополнительных датчиков (точечных строк) по сравнению co временем прогнозируемым моделью, когда пламя достигло датчика. Для того, чтобы принимать во внимание различия В the mass fraction burned assumed that the flame center remained at the spark plug. Firstly the area of the flame contour under question was calculated. This is simply the projected area of the enflamed volume on the line of flame propagation. The volume enflamed was then taken to be the volume of the sphere centered at the spark plug having the same projected area (on the line of flame propagation) to the area of the contour. A constant ratio of unburned to burned gas densities of 4 was assumed. If the flame contour is very irregular, the above assumption is not valid. However, where mean contours of 350 cycles are examined the approximation is good.

The assumption of no flame center motion then was examined; it was shown that with this assumption the mass fraction calculated was the lower bound. The actual value could be as much as 5% more depending on the distance moved and also on the direction moved. The reason for this is that although the flame contours show that their center displaced from the spark plug, the motion is in the azimuthal direction thus keeping the

высоте между линиями распространения И показаниями датчиков расположенных y стенок цилиндра, пламя было взято так, чтобы иметь постоянный радиус в вертикальном направлении этой ДО точки. Как мы можем видеть есть некоторое отклонение. Это должно быть объяснено вышеуказанными аргументами, задерживающими распространение пламени около стены, на рис. 12 показано как оптический латчик показывает положение переднего края фронта (и следовательно непосредственно запаздывание пламени цилиндра) y стенок как ВИДИМ имеющего хорошее совпадение с моделью. Рисунок 13 показывает что необходима корреляция из-за запаздывания пламени при помощи изменения расстояния датчика расположенного головке цилиндра показывающего линию распространения пламени.

Другие точки тоже должны были приняты в расчет. Время прибытия пламени полученное ионизационными датчиками, расположенными в главной прокладке усреднено из результатов множества повторяющихся циклов 300distance of their center to the center of the combustion chamber the same as before and equal to the distance of spark plug to the center of the combustion chamber. This, because the cylinder head is hemispherical, means that the mass fraction burned does not change. If the center moves towards the center of the cylinder (worst case) the mass fraction burned is bigger because the enflamed region is truncated less by the piston and the cylinder head walls.

The same arguments can be used to correct for the assumptions used in the derivation of equation (6). Unburned fuel inside the flame brush would reduce the mass fraction burned. We noted before that the flame contour lies between the flame front and flame back, but this does not mean that it corresponds to mean mass fraction unburned equal to zero contour. It is rather a geometrical mean, and taking into account the fact that the unburned gas is roughly 4 times as dense as the burned gas, it is obvious that the mean contour may contain net unburned gas. The above two phenomena tend to oppose each other. This may be a reason for the good agreement between

350. Поскольку пламя представляет собой тонкую сморщенную поверхность химических реакций, то время прибытия получается не соответствует переднему краю фронта пламени а очерчивает контур между усредненным фронтом пламени И усредненным пламенем (внутренний контур). Следовательно, измеренное прибытие фронта пламени немного позже, чем время прибытия, переднего края пламени. В результате модель дает положение усредненного контура точнее переднего края. Это было принято во внимание при рисовании контуров пламени ПО оптическим Лучшее данным. соглашение с экспериментальными результатами было получено, когда приняли толщину фронта пламени равной 2-3 мм, и уменьшения прибытия было время объяснено этим. Кроме того, 10° угла обзора оптического датчика также были приняты во внимание. Это требует исправления примерно на 1 мм.

Результаты были также проверены на основании многих повторяющихся циклов. Подход был тот же самый; предсказанное местоположение наносилось на график когда пламя

the model prediction and the independent thermodynamic analysis. (Fig. 17).

CONCLUSIONS.

A model has been developed for the conversion of flame arrival times at a set of head gasket ionization probes to flame contours. The model has been tested, against experimental results and good agreement was found. The tests included flame arrival time prediction at specific positions in the cylinder and mass fraction burned predictions at a given time. The flame contours exhibit the expected sensitivities to operating condition variations such as equivalence ratio and engine flowfield. The ability to generate accurate flame contours should increase the utility of this diagnostic significantly.

прибывало в тестирующий датчик. На этот раз тем не менее, частотный график был получен для всех 350 циклов. Рисунок 14 графики показывает полученных Частотный результатов. график показывает, что предсказанные позиции располагаются вокруг средней позиции использованной В ранее рассмотренных результатах. Распространение будет хорошее В диапазоне цикла, для того чтобы цикл изменился и есть нечто по сравнению с предлагаемой затем моделью не применяется для вычерчивания контура одиночного цикла. Распространение хорошо в пределах пределов цикла к изменению цикла и нет, ничего, чтобы предложить когда модель не применима для того, чтобы составить вычерчивания отдельных контуров цикла.

Дополнительный для тест модели должен бы проверять, как прогнозируемые контуры пламени изменяются в двигателе при рабочих Например, режимах. среднеквадратичное отклонение В контурах должно возрастать когда воздух/топливо коэффициента (α становится хуже не Рисунок 15 стехиометрическое).

52

показывает этот эффект. Рисунок 16 показывает вращение потока, формируемое при впуске потока в цилиндр.

Мы можем также проверять, сгорела ли массовая фракция как предсказано объемом сгоревшим была ЛИ последовательность между различными случаями, и согласуется ли с помощью термодинамического анализа прослеженное измерение, с полученным с использованием анализа кривых одной зоны давления модели [22]. Вычисление массовой сгоревшей доли смеси предполагает, что центр воспламенения остается у свечи зажигания. Во-первых, расчеты области контура пламени остаются под вопросом. Это - просто спроецированная область сгоравшего объема на линии распространения пламени. Сгоревший объем был взят чтобы затем найти объем сферы центрированной по свече зажигания имеющем же самую тy спроецированную область на ЛИНИИ распространения пламени что и область контура. Постоянное отношение не сожженного к сожженному удельному весу газа принимается равное 4. Если не пламя очерчивает контур очень

регулярно, выше указанное предположение неправильное. Тем не менее, где средние контуры 350 циклов изучены и дали хорошую аппроксимацию.

Предположение о том ЧТО центр пламени неподвижен затем было было исследовано; показано что С помощью ЭТОГО предположения расчетная массовая доля являлась Фактически нижним пределом. величина могла быть на целых 5% больше, В зависимости ОТ перемещенного расстояния и также от направления перемещения. Причина для этого состоит в том, что, хотя контуры пламени показывают ЧТО ИХ центр смещается от свечи зажигания, но перемещение происходит В азимутальном направлении, таким образом расстояние от центра фронта пламени до центра камеры сгорания сохраняется постоянным И равным расстоянию от свечи зажигания до центра камеры сгорания. Это потому форма что камеры сгорания полусферическая, это означает, что массовая доля сожженной смеси не изменится. Если центр перемещается к центру цилиндра (худший случай)

массовая сожженная доля больше потому что сгоревшая область меньше отсекается поршнем и стенками цилиндра.

Te же самые аргументы могут использоваться, чтобы исправить OT предположений, используемых при выводе уравнения (6). Несгоревшее топливо в складках пламени уменьшило бы массовую сожженную долю. Мы отметили перед этим, что контуры пламени лежат между фронтом пламени и внутренней поверхностью пламени, это означает, но не что ОН соответствует, средней массовой доле несгоревшего топлива равной нулевому Это контуру. скорее среднее геометрическое и берется в расчет, что фактически несгоревший газ примерно в 4 раза более плотен, чем сожженный газ. очевидно, что средний контур может содержать чистый несгоревший Вышеупомянутые газ. два явления противопоставляются друг против друга. Это может быть причиной для хорошего соглашения между прогнозом модели И независимым термодинамическим анализом. (Рисунок 17).

ВЫВОДЫ.

Модель была разработана для
преобразования времени прибытия
пламени фиксируемое ионизационными
датчиками, установленными в главной
прокладки в контуры пламени. Модель
была протестирована, было проведено
сравнение с экспериментальными
результатами и было получено хорошее
соглашение. Испытания включали
прогноз времени прибытия пламени в
различные места в цилиндре и массовая
доля сгоревшего топлива
прогнозируемая в данное время.
Контуры пламени показывают
ожидаемую чувствительность к
различным изменениям
эксплуатационного режима и поля
течения двигателя. Способность
производить точные контуры пламени
должна значительно увеличить
полезность такой диагностики.

1.3 Постановка задач исследования

Проведенный анализ научных исследований показал, что наиболее полно, из существующих моделей, описывает термодинамические эффекты процесса сгорания модель И.И. Вибе, в которой в тоже время существует некоторая неопределенность при определении входящих в неё коэффициентов. Глава 2 Экспериментальное оборудование и погрешность экспериментов

2.1 Экспериментальная установка УИТ – 85

Одноцилиндровая установка УИТ-85 позволяет с высокой точностью воспроизводить условия сгорания и рабочие процессы характерные для действительного цикла реальных двигателей с искровым зажиганием. На рисунке 2.1 представлено фото установки, где мы можем видеть, что установка оснащена пультом управления позволяющим регулировать частоту вращения 600 и 900 мин⁻¹, имеет подогреваемый впускной коллектор и трехбачковый карбюратор, также может варьировать степень сжатия с 4 до 10.



Рисунок 2.1 – Общий вид экспериментальной установки УИТ-85

В камере сгорания имеется штатное место для установки различных датчиков и варьировании положения свечи зажигания. Для регистрации характеристик сгорания и распространения фронта пламени использовались датчики ионизации и давления.

57

2.2 Оценка погрешностей измерений

Оценка погрешности прямых измерений электропроводности пламени и индикаторного давления осуществлялась по ГОСТ Р 8.736-2011 [21].

Τ Γ 01			
Таолина 7 Г -	Опенка случаинои пог	решности прямых изм	ерении лля УИТ-85
1 иолици 2.1	Outerina esty familien noi	pemileern npmilbin non	

Коэффици ент избытка воздуха	Массов ая доля водород а, %	t ₁ , мс	$\delta t_1,\%$	t ₂ , мс	$\delta t_2, \%$	Р _z , МПа	$\delta P_z,\%$	Часто та вращ ения, мин ⁻¹	Угол опере жени я зажиг ания
1,134	0	1,68542	0,123	5,67969	1,072	1,2875	1,344	900	19
1,259	0	2,02018	0,308	6,28349	1,293	1,0707	1,057	900	19
1,123	0	1,55238	0,365	5,28571	1,318	1,31	1,5	900	19
1,051	0	1,65234	0,45	5,52617	1,12	1,4329	12,422	900	19
0,976	0	1,48936	0,131	5,56596	1,047	1,4705	2,43	900	19
0,981	0	1,62258	0,093	5,56344	1,093	1,4824	3,351	900	19
0,934	0	1,58864	0,169	5,60114	1,185	1,37	7,125	900	19
0,715	0	2,56304	0,151	7,34783	1,106	1,0334	5,802	900	19
1,04	0	1,91774	0,246	8,31935	5,992	1,25	3,385	600	0
1,06	0	1,68769	0,27	7,62154	2,96	1,75	2,245	600	11
1,04	0	1,69254	0,581	7,67612	0,556	1,81	1,671	600	13
1,04	0	1,42188	0,344	7,42188	1,086	2,08	0,545	600	19
1,04	0	1,44655	0,452	7,14483	1,342	2,22	0,678	600	21
1,04	0	1,42222	0,705	6,72593	1,325	2,41	0,351	600	24
1,03	0	1,38243	0,257	6,55	1,815	2,5	0,414	600	27
1,04	0	1,36588	0,52	6,00706	0,971	2,65	0,265	600	30
1,04	0	1,38243	0,285	5,79189	0,791	2,74	0,232	600	33
1,147	0	2,10976	0,276	8,09268	1,184	1,761	4,111	600	13

Продолжение таблицы 2.1

					1		1		
1,062	0	1,65618	0,191	7,66854	1,835	1,833	1,854	600	13
1,251	0	1,92658	0,204	7,83924	0,845	1,748	1,942	600	13
1,048	0	1,74111	0,096	7,53667	0,901	1,871	0,52	600	13
1,051	0	1,7	0,318	7,64444	1,105	1,898	1,507	600	13
1,007	0	1,55128	0,345	7,42821	0,851	1,878	1,152	600	13
0,932	0	1,74318	0,236	8,00568	0,289	1,7	1,856	600	13
0,82	0	2,19778	0,265	8,50444	0,193	1,38	9,488	600	13
0,929	0	1,63409	0,157	7,61023	1,205	1,837	1,481	600	13
1,412	0	2,05	1,502	6,45	0,454	0,92	5,189	900	21
1,345	0	2,03263	0,406	6,23263	1,465	1,12	0,937	900	21
1,281	0	1,92784	2,311	5,96392	0,888	1,16	1,934	900	21
1,221	0	1,82083	0,904	5,77292	0,898	1,24	0,702	900	21
1,235	0	2	0,142	6,35	1,356	1,1	1,416	900	21
0,973	0	1,5	0,214	5,43	0,803	1,45	0,569	900	21
0,927	0	1,6	1,313	5,63	0,779	1,31	0,622	900	21
0,881	0	2,00577	0,357	6,19712	0,978	1,14	0,72	900	21
0,842	0	2,33846	0,271	6,63942	0,927	1,05	0,821	900	21
0,744	0	1,88364	0,373	8,49545	1,323	0,71	1,327	900	21
0,726	0	2,7	0,13	8,72	0,638	0,66	1,173	900	21
0,712	0	3,2	1,314	8,79	0,47	0,64	0,83	900	21
1,085	18,9794	1,17544	0,123	5,4	0,689	2,39	0,272	600	13
0,693	18,3502	0,82045	0,308	6,92456	0,863	1,925	0,541	600	13
1,089	22,6763	0,93673	0,365	5,01591	0,998	2,495	0,258	600	13
1,046	16,3315	0,8625	0,45	5,45102	0,967	2,305	0,456	600	13
0,948	17,9884	0,83333	0,131	5,55938	0,862	2,43	0,303	600	13
0,831	20,0612	0,99615	0,093	5,48125	0,718	2,39	0,464	600	13
1,11	13,7481	0,9413	0,169	5,78846	0,895	2,27	0,562	600	13
0,901	13,9408	1,1	0,151	5,88043	0,84	2,38	0,925	600	13
•	•		•	•	•		•		

Продолжение таблицы 2.1

1,078	9,00854	0,97955	0,246	6,75	0,333	2,25	0,517	600	13
0,832	14,4811	1,005	0,27	6,075	0,879	2,2	0,923	600	13
0,994	11,8831	1,25	0,581	6,02	1,017	2,28	0,942	600	13
1,048	4,46293	1,09275	0,344	5,7	0,991	2,075	0,554	600	13
0,917	8,90384	1,12558	0,452	6,23043	0,866	2,17	0,768	600	13
1,049	7,35213	1,41892	0,705	6,40233	0,898	2,145	0,798	600	13
0,926	2,96829	1,22286	0,257	7,0027	0,981	2,01	0,648	600	13
1,018	4,70406	1,37963	0,52	6,73143	0,742	2,07	2,768	600	13
1,075	3,13887	1,65	0,285	6,91111	2,226	2,025	2,812	600	13
1,012	0	1,44	0,276	7,35	1,484	1,85	1,077	600	13
0,841	4,35613	1,81961	0,191	7,225	1,056	1,865	0,754	600	13
0,711	10,8674	1,24333	0,204	8,52353	0,883	1,46	0,733	600	13
0,782	9,23773	1,55625	0,189	6,92667	0,887	1,93	0,616	600	13
0,733	13,7508	2,085	0,096	7,8625	0,844	1,62	0,634	600	13
0,748	4,78109	1,61449	0,318	1,44	0,375	1,31	6,715	600	13
0,874	0	2,90811	0,345	7,58406	0,593	1,848	1,404	600	13
0,733	0,72383	1,64	0,236	10,2459	0,666	1,05	3,013	600	13
0,832	0	1,63243	0,265	7,97164	0,948	1,667	2,323	600	13
0,933	0	1,17544	0,157	7,55541	1,665	2	1,097	600	13
1,843	30,8446	1,19429	1,502	5,65429	1,98	2,1	2,63	600	13
1,812	27,5564	1,21277	1,436	5,98936	2,488	1,948	1,247	600	13
2,682	60,109	1,27	0,406	6,25	3,682	1,737	2,325	600	13
1,773	24,5363	1,24688	1,258	6,10313	1,881	1,984	3,202	600	13
1,706	23,1534	1,22969	2,311	5,93438	0,296	2,133	0,797	600	13
1,266	0	1,04	1,398	5,45	0,245	2,177	1,077	600	13
1,506	19,0842	1,13067	0,904	5,712	0,219	2,183	1,332	600	13
1,561	21,2966	1	0,142	5,55	1,075	2,257	0,41	600	13
1,4461	21,312	1,0378	0,214	5,36829	0,904	2,287	0,321	600	13
	•		•		•			•	

Продолжение таблицы 2.1

1 5 (01	15 20 42	1 20055	1 212	< 0 177	0.256	1 00 1	1.055	(00)	10
1,5681	15,3943	1,28955	1,313	6,24776	0,356	1,991	1,955	600	13
1,6631	11,8789	1,4122	0,357	6,67317	1,584	1,77	6,035	600	13
1,5041	14,4411	1,22063	0,271	6,0127	0,925	2,17	0,32	600	13
1,4361	15,6671	1,18987	0,373	5,77595	0,929	2,248	0,643	600	13
1,2461	21,6268	0,88704	0,13	4,96111	0,824	2,493	0,28	600	13
1,502	9,47273	1,33793	1,314	6,6069	1,942	1,903	7,437	600	13
1,457	10,6929	1,23617	0,479	6,2766	1,851	2,019	5,151	600	13
1,306	11,8806	1,1661	0,287	6,03051	1,044	2,175	0,476	600	13
1,238	15,2615	1,01774	0,184	5,53387	1,06	2,363	0,534	600	13
1,395	7,45394	1,31667	1,386	6,5381	1,488	2,108	0,507	600	13
1,309	4,62705	1,38806	1,233	6,8597	1,265	2,048	0,609	600	13
1,337	5,73594	1,3254	1,312	6,60317	0,551	2,107	1,064	600	13
1,264	4,83271	1,34068	1,533	6,69661	0,932	2,145	0,411	600	13
1,248	5,46529	1,29167	1,356	6,54792	0,86	2,181	1,758	600	13
1,259	5,20825	1,34043	1,409	6,64468	1,016	2,14	0,407	600	13
1,261	5,36621	1,23947	1,151	6,61842	0,887	2,165	0,421	600	13
1,273	10,918	1,13043	1,023	6,02174	0,963	2,25	0,314	600	13
1,123	9,38448	1,09254	0,864	6,39254	1,035	2,257	0,523	600	13
1,217	10,0593	1,09672	0,721	6,53934	1,024	2,164	0,676	600	13
1,174	0	1,61905	1,224	7,46429	1,124	1,955	1,203	600	13
1,273	0	1,75714	0,779	7,65306	0,981	1,935	3,374	600	13
1,212	0	1,61587	0,874	7,50794	0,816	2,005	0,481	600	13
1,168	0	1,62	0,756	7,56286	1,011	1,965	0,746	600	13
1,168	0	1,5	0,917	7,7	0,875	1,926	0,641	600	13
1,101	0	1,60615	0,758	7,62769	0,836	1,889	0,72	600	13
1,539	15,0343	1,10455	0,134	5,57992	0,588	1,527	0,47	900	13
1,422	15,0488	1,06052	0,195	5,33377	0,615	1,705	0,452	900	13
1,338	14,9723	0,97053	0,226	5,1063	0,893	1,858	0,336	900	13
•	•	•	•	•	•		•		

Продолжение таблицы 2.1

1,462	9,98225	1,1753	0,174	5,7081	0,834	1,571	0,466	900	13
1,207	15,0145	0,86422	0,196	4,7406	0,925	2,12	4,176	900	13
1,354	10,0199	1,08187	0,145	5,46667	0,631	1,731	0,34	900	13
1,123	14,9932	0,83063	0,234	4,60937	0,768	2,044	0,245	900	13
1,226	10,039	0,97628	0,19	5,13316	1,018	1,899	0,356	900	13
1,396	5,07788	1,28154	0,12	6,0141	0,973	1,539	1,26	900	13
1,451	5,01146	1,37206	0,156	6,21569	1,105	1,47	2,018	900	13
1,136	10,0072	0,93557	0,214	4,98408	0,946	1,957	0,282	900	13
1,368	4,98868	1,21881	0,246	5,98097	0,872	1,638	0,788	900	13
1,197	8,88332	0,97765	0,212	5,11704	0,784	1,918	0,279	900	13
0,988	15,0237	0,82979	0,275	4,51537	0,682	2,15	2,649	900	13
0,821	5,02607	1,6735	0,155	6,41382	0,896	1,568	0,62	900	13
1,252	5,00795	1,10905	0,208	5,59845	0,803	1,764	0,466	900	13
1,366	0	2,13388	0,215	7,18176	0,845	1,269	3,301	900	13
1,001	9,98909	0,91567	0,206	4,82009	0,787	2,048	0,243	900	13
1,11	5,05255	1,0117	2,224	5,30745	0,899	2,201	7,276	900	13
1,317	0	1,98277	0,125	6,92923	0,929	1,339	0,713	900	13
0,928	10,3873	1,05729	0,478	5,01407	0,71	2,072	2,59	900	13
0,803	15,0095	1,3059	0,467	5,51695	0,711	1,887	4,058	900	13
1,264	0	1,75298	0,104	6,59857	0,758	1,428	0,694	900	13
1,016	4,99608	1,09185	0,23	5,29031	0,824	2,008	0,447	900	13
1,175	0	1,49691	3,252	6,2223	0,663	1,608	1,01	900	13
1,005	0	1,33794	0,128	5,96125	0,713	1,818	1,611	900	13
0,905	0	1,49229	1,794	6,2625	0,712	1,71	1,981	900	13
0,8403	0	1,84289	0,204	6,7803	0,82	1,472	1,156	900	13
0,769	0	2,825	0,309	8,20449	1,124	1,012	1,173	900	13
0,867	9,9915	1,84289	0,121	6,7803	0,792	1,631	0,537	900	13

2.3 ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Применяемые оборудование и датчики позволяют выполнить поставленные цели и задачи исследования.

2. Анализ погрешности измерений экспериментальных исследований и методы статистической обработки полученных сигналов показали высокую достоверность полученных результатов.

Глава 3 Результаты экспериментов и их анализ

3.1 Результаты экспериментального исследования проведенного на УИТ-85

Актуальность исследований процессов горения традиционных углеводородных топлив и альтернативных, с добавкой водорода, обусловлена глобальными политико-экономическими процессами, связанными с нефтяными ресурсами и экологическим состоянием окружающей среды. Исследования особенностей сгорания топливно-воздушной смеси (ТВС) при небольших добавках водорода, позволят лучше оценить положительное влияние водорода на процесс сгорания углеводородных топлив и способствовать его переходу от исследований к практическому применению.

В ТолГУ, на кафедре тепловые двигатели были проведены испытания на одноцилиндровой установке УИТ-85 с датчиком ионизации (ДИ), установленным в зону камеры сгорания (КС), наиболее удаленную от свечи зажигания, с целью определения взаимного влияния добавок водорода, коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени в основной и заключительной фазах сгорания, и концентрацию несгоревших углеводородов (СН) в отработавших газах, и показателя характера сгорания т. Режимы испытаний были определены возможностями установки: степень сжатия 7, скоростной режим 600 и 900 об/мин, при изменении коэффициента избытка воздуха α от 1 до пределов бедного срыва, и при добавке в ТВС газообразного водорода в количестве не более 6% от расхода топлива. Режимы состава смеси поддерживались изменениями расходов водорода и бензина. В испытаниях осцилографировался ток на ДИ. По результатам измерений отрезка времени t, который включает в себя включает, развитие начального очага пламени и распространение фронта турбулентного пламени по объему КС, определено среднее значение скорости распространения пламени W в "основной" фазе сгорания в КС УИТ-85, [1] рисунок 3.1.

64



Рисунок 3.1 – Взаимосвязь средней скорости распространения пламени в "основной" фазе с коэффициентом избытка воздуха α, при различных добавках водорода, режим работы 600 об/мин, УОЗ=13°.

Наличие тока в цепи ДИ обусловлено протеканием реакций горения в полости, где установлен датчик. Путь распространения фронта пламени в этой зоне КС неизвестен, поэтому для определения уровня скорости выгорания использован габаритный размер полости ДИ. Средняя скорость пламени в полости датчика определена как:

$$V = \frac{L}{\tau}, \qquad (3.1)$$

где L = 3,5 мм – высота полости, где установлен ДИ, τ - продолжительность сигнала на ДИ. Так как достижение пламенем ДИ соответствует выгоранию основной массы заряда, то значение V определено как средняя скорость

65

пламени в «заключительной» фазе сгорания [1], рисунок 3.2. Для определения концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах использовался газоанализатор EIR-2105 фирмы Yanaco (Япония).



Рисунок 3.2 – Взаимосвязь скорости распространения пламени в "заключительной" фазе с коэффициентом избытка воздуха α, при различных добавках водорода, режим работы 600 об/мин, УОЗ=13°.

В качестве примера приводятся результаты, полученные для режима работы: при 600 об/мин и угле опережения зажигания (УОЗ) 13°.

На рисунке 3.1 и 3.2 показаны взаимосвязи средних скорости распространения пламени в "основной" и "заключительной" фазах сгорании соответственно, с коэффициентом избытка воздуха α, при различных добавках водорода в ТВС. Как показано в работах [2] пламя в заключительной фазе имеет ламинарную или мелко турбулентную структуру, и подчиняется законам ламинарного горения. По этому физико-химические свойства смеси оказывают превалирующее влияние на сгорание в заключительной фазе и выгорание пристеночного слоя в цилиндре ДВС [3, 4]. В соответствии с теорией турбулентного горения газов, разработанной К.И. Щелкиным, турбулентная скорость зависит от нормальной скорости распространения пламени, что теоретически подтверждает влияние физико-химических свойств смеси на сгорание в «основной» фазе, определенное в данной работе. Таким образом, небольшое добавление водорода в ТВС, позволяет заметно повысить как ламинарную, так и турбулентную скорость распространения пламени.



Рисунок 3.3 – Взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах с объемом камеры сгорания в момент завершения горения и коэффициентом избытка воздуха α, при различных добавках водорода, режим работы 600 об/мин, УОЗ=13°.

Ужесточение норм токсичности, заставляют уделить пристальное внимание на взаимосвязь между концентрацией СН в отработавших газах и физико-химическими свойствами ТВС. Как показано в [5] основное влияние на СН при α больше 1, оказывает пристеночный слой. Поэтому было оценено влияние объема КС в момент окончания сгорания, завершение сигнала на ДИ, на концентрацию СН в отработавших газах. На рисунках 3.3 и 3.4 показана взаимосвязь концентрации СН с объемом камеры сгорания, при различных коэффициентах избытка воздуха α и добавках водорода.



Рисунок 3.4 – Взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах с объемом камеры сгорания в момент завершения горения, при различных добавках водорода, режим работы 600 об/мин, УОЗ=13°.

Из рисунков видно, что добавление водорода снижает концентрацию СН в отработавших газах больше, чем это можно было бы объяснить уменьшением площади поверхности камеры сгорания в момент завершения горения. Это объясняется тем, что водород имеет высокие диффузионные свойства, а так же он при высоких температурах разлагается на свободные радикалы H, которые являются активными центрами горения, тем самым, активизируя горение TBC, что уменьшает толщину пристеночного слоя. Это позволяет говорить об эффективности применения малых добавок водорода для снижения концентрации несгоревших CH в отработавших газах.

Добавление небольшого количества водорода в ТВС позволяет увеличить как ламинарную, так и турбулентную скорость распространения пламени, увеличение скорости сгорания, обеспечивает выделение большей части тепла в процессе, близком к изохорному, тем самым, повышая КПД процесса. Так же добавление водорода снижает концентрацию несгоревших СН в отработавших газах, как за счет уменьшения площади пристеночного слоя в момент окончания сгорания, так и за счет уменьшения толщины этого слоя. Тем самым полученные результаты позволяют говорить об эффективности и целесообразности малых добавок водорода в ТВС.

3.2 Влияние добавки H₂ в сжатый природный газ на концентрацию несгоревших углеводородов и угарного газа в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием

Применение добавок альтернативных топлив, a также интенсифицирующих процесс сгорания классических углеводородных топлив сопряжено с комплексным исследованием возможности применения на выпускаемые модели двигателей без существенного изменения в конструкции и анализа эффективности применения новых топлив. Применение природного газа в качестве основного топлива зачастую приводит к значительному росту токсичности отработавших газов по несгоревшим углеводородам вследствие большей задержки воспламенения и увеличившейся продолжительности процесса сгорания, что приводит к повышенной неполноте сгорания. В мировой практике активно применяются газовые смеси, состоящие из 85% сжатого природного газа и 15% водорода позволяющего интенсифицировать

69

процесс сгорания и выполнить все современные нормы по токсичности ОГ. В результате целью проводимых исследований было определение влияние количества добавляемого водорода в СПГ на токсичность отработавших газов по несгоревшим углеводородам и угарному газу.



Рисунок 3.5 - Зависимость концентрации СН в ОГ от состава смеси при различных добавках водорода в СПГ для УИТ-85, режим работы n = 900 1/мин, $YO3 = 13^{\circ}$. $\varepsilon = 7$.

На рисунке 3.5 приведена зависимость концентрации СН в ОГ от состава смеси при различных добавках водорода в метановоздушную смесь для УИТ-85, режим работы: 900 об/мин, УОЗ=13° ПКВ, показывающая снижение токсичности по СН при добавке водорода и смещение минимума по токсичности в область бедной смеси, так минимум для метановоздушной смеси соответствует $\alpha = 1.17$, а при добавке 10% и 15% водорода от массы топлива минимум по токсичности СН смещается до $\alpha = 1.31$ и $\alpha = 1,38$ соответственно. Что говорит о повышении полноты сгорания при добавке водорода на бедных смесях. Также при 15% добавке водорода происходит снижение концентрации СН в ОГ для $\alpha = 1$ на 20 ppm, что составляет 15% уменьшение токсичности, а для $\alpha = 1.15$ и 1.35 снижение составило 30 и 60 ppm, что составляет уменьшение токсичности на 27 и 46% соответственно. В тоже время результаты проведенных экспериментальных исследований не выявили существенного влияния 5 и 10% добавки водорода в СПГ на концентрацию по несгоревшим углеводородам в ОГ, разбег значений находился в пределе 5% погрешности на основных режимах работы, можно лишь констатировать смещение минимума в область бедных смесей.



Рисунок 3.6 - Зависимость концентрации СО в ОГ от состава смеси при различных добавках водорода в СПГ для УИТ-85, режим работы n = 900 1/мин, УОЗ = 13°, ε = 7: а) – во всем исследуемом диапазоне от α = 0.7 до 1.6; б) – в диапазоне бедной смеси от α = 1.0 до 1.6.

На рисунке 3.6 приведена зависимость концентрации СО в ОГ от состава смеси при различных добавках водорода в метановоздушную смесь для УИТ-85, режим работы: 900 об/мин, УОЗ=13° ПКВ, показывающая снижение токсичности по СО при добавке водорода. Снижение токсичности по СО в ОГ при добавке 10 и 15% водорода в СПГ наблюдается на богатых (рисунок 3.6а) примерно на 5-7% и на бедных смесях (рисунок 3.6б) с 0.04 до 0.02%, что составляет снижение на 50%, в то же время на стехиометрическом составе смеси добавка водорода не приводит к уменьшению токсичности по СО. Также установлено, что нет значительного различия в концентрации СО в ОГ при добавке 10 или 15% водорода.



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

 $\varepsilon = 7.$

Полученные результаты по снижению токсичности ОГ по несгоревшим углеводородам и угарному газу в области бедных смесей показывают, что добавка водорода повышает скорость распространения пламени и интенсивность протекания процесса сгорания. Интенсивность протекания процесса сгорания можно оценить по электропроводности пламени, т.к.
основным источником ионного тока проводимости являются ионы углерода, а при добавке водорода происходит снижение концентрации атомов углерода в TBC, следовательно, характеристика изменения ионного тока пламени позволит оценить изменение интенсивности протекания химических реакций во фронте пламени при добавке водорода.

На рисунке 3.7 представлена зависимость амплитуды сигнала ионного тока пламени на датчике, установленном в удаленной части КС, от состава смеси при различных добавках водорода в СПГ для УИТ-85, режим работы n = 900 1/мин, УОЗ = 13° , $\varepsilon = 7$. Из рисунка видно, что изменение амплитуды сигнала ионного тока проводимости наблюдается на бедных смесях, причем с обеднением влияние водорода на рост интенсивности протекания процесса сгорания СПГ увеличивается. Также следует отметить расширение пределов устойчивого сгорания в области бедных смесей с $\alpha = 1.38$ до $\alpha = 1.45$ и $\alpha = 1.54$ при добавке в СПГ 10 и 15% водорода соответственно.

Проведённые исследования позволяют расширить понимание влияния добавки водорода в СПГ на токсичность ДВС, по несгоревшим углеводородам и угарному газу. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования процесса сгорания при разработке новых способов организации рабочего процесса ДВС, при работе на альтернативном топливе СПГ с добавкой водорода.

Также добавка водорода в СПГ снижает токсичность по СО на бедных смесях на 50%, при этом снижение токсичности в области богатых и стехиометрических смесей незначительно.

3.3 Скорость распространения пламени по фазам сгорания

3.3.1 Средняя скорость распространения пламени в основной фазе сгорания

На рисунке 3.8 представлена зависимость средней скорости распространения фронта пламени в основной фазе сгорания от состава смеси

при различных добавках водорода в СПГ для УИТ-85, режим работы n = 600 1/мин, УОЗ = 13°, ε = 7.



Рисунок 3.8 - Зависимость средней скорости распространения фронта пламени в основной фазе сгорания от состава смеси при различных добавках водорода в

СПГ: режим работы n = 600 1/мин, УОЗ = 13°, $\varepsilon = 7$.

Из рисунка 3.8 видно, что добавка водорода значительно расширяет предел устойчивого сгорания при работе на бедных смесях, так при работе на СПГ он соответствовал $\alpha \approx 1.3$ -1.4, то при добавке 15% водорода в СПГ он стал составлять $\alpha \approx 1.7$ -1.8.

Рассмотрим влияние добавки водорода в СПГ на среднюю скорость распространения фронта пламени в основной фазе сгорания при частоте вращения 900 об/мин, представленное на рисунке 3.9. Оценивая изменение средней скорости распространения фронта пламени при увеличении частоты вращения с 600 до 900 об/мин, следует отметить, что наибольшее влияние увеличения частоты вращения наблюдается в районе стехиометрического состава смеси, так в области богатых смесей (α =0.8-0.95) и бедных смесей (α =1.1-1.4) увеличение средней скорости составило 14-19%, в тоже время, как

на составах смеси (α=0.95-1.1) прирост достигал 24-27%, как для СПГ, так и при добавке до 15% водорода.





СПГ для УИТ-85, режим работы n = 900 1/мин, УОЗ = 13°, $\varepsilon = 7$.

3.3.2 Средняя скорость распространения пламени в 1-ой фазе сгорания

На рисунке 3.10 представлена зависимость средней скорости распространения фронта пламени в начальной фазе сгорания (путь от электрода свечи зажигания до датчика ионизации расположенного в 7 мм) от состава смеси при различных добавках водорода в СПГ для УИТ-85, режим работы n = 600 мин^{-1} , УОЗ = 13° , $\varepsilon = 7$.

Из рисунке 3.10 видно, что добавка водорода дает увеличение средней скорости распространения фронта пламени в начальной фазе сгорания примерно на 1 м/с на каждые 5% добавляемого в СПГ водорода.



Рисунок 3.10 - Зависимость средней скорости распространения фронта пламени в начальной фазе сгорания от состава смеси при различных добавках водорода в СПГ: режим работы n = 600 мин⁻¹, УОЗ = 13°, ε = 7.



Рисунок 3.11 - Зависимость средней скорости распространения фронта пламени в начальной фазе сгорания от состава смеси при различных добавках водорода

в СПГ: режим работы n = 900 мин⁻¹, УОЗ = 13°, $\varepsilon = 7$.

Из рисунка 3.11 показано, что с увеличением числа оборотов влияние водорода на среднюю скорость распространения фронта пламени в начальной фазе сгорания насколько уменьшилось в зоне богатых смесей и составило примерно 0,7 м/с на каждые 5% добавляемого водорода.

3.4 Основные результаты измерений в экспериментальной установке

Результаты экспериментального исследования показали, что добавки водорода в метановоздушную смесь приводят к следующим особенностям протекания процесса сгорания:

- в 1-ой фазе добавка водорода позволяет лучше использовать увеличение интенсивности турбулентности при увеличении частоты вращения для развития начального очага горения;
- во основной фазе сгорания влияние 10% добавки водорода на среднюю скорость распространения пламени сравнима с увеличением скоростного режима на 50% (эквивалентное возрастанию турбулентности на 1,66 раза).

Глава 4 Обобщение выявленных особенностей процесса сгорания при добавке водорода в СПГ

4.1 Средняя скорость распространения фронта пламени СПГ с добавкой водорода в условиях КС поршневого ДВС

Анализ экспериментальных данных и критический обзор известных источников позволили выделить основные факторы влияющие на среднюю скорость распространения фронта пламени в 1-ой фазе сгорания и после математического моделирования получить эмпирическую зависимость для расчета средней скорости распространения фронта пламени СПГ в условиях УИТ-85, которая представлена уравнением (4.1)

$$U_1 = U_{H \ CH4} \cdot \alpha^2 + U_{H \ CH4} \cdot \overline{\alpha} \cdot 1 - \frac{U_{\Pi, cp}}{U_{H \ CH4}} \cdot M/c$$
(4.1)

где $U_{H \ CH4}$ - нормальная скорость распространения фронта пламени, м/с; $U_{n.cp}$ - средняя скорость поршня; α – коэффициент избытка воздуха.

Продолжая моделировать влияние водорода на процесс сгорания в первой фазе, было проведено обобщение и дополнение эмпирической зависимости (4.1) и получена эмпирическая зависимость для расчета средней скорости распространения фронта пламени СПГ с долей водорода до 15% от массы топлива, которая представлена в (4.2):

$$U_{1} = U_{H \ CH4} \cdot \alpha^{2} + U_{H \ CH4} \cdot \overline{\alpha} \cdot 1 - \frac{U_{\Pi.cp}}{U_{H \ CH4}} \cdot 1 - \frac{\Delta H}{100} - K_{H}$$
$$- 4,3 \cdot \alpha^{2} - 10,285 \cdot \alpha + 4,6 \cdot \overline{U_{\Pi.cp} \cdot U_{H(H2)} \cdot \frac{\Delta H}{100}} (M/c)$$
(4.2)

где:

$$K_H = 4,3 \cdot \alpha^2 - 10,285 \cdot \alpha + 4,6 \cdot U_{\Pi.cp} \cdot U_{H(H2)} \cdot \frac{\Delta H}{100}$$
 - член

учитывающий влияние водорода на среднюю скорость распространения фронта пламени в первой фазе сгорания, при изменении турбулентности связанной с изменением частоты вращения КВ, в котором

 $4,3 \cdot \alpha^2 - 10,285 \cdot \alpha + 4,6$ - выражение учитывающее влияние состава смеси на промотирующую процесс сгорания добавку водорода;

ΔH - процентное содержание добавляемого газообразного водорода от массы топлива;

 $1 - \frac{\Delta H}{100}$ - выражение учитывающее долю метана в топливе; $\frac{\Delta H}{100}$ - выражение учитывающее долю свободного водорода (H₂) в топливе.

Получив зависимость средней скорости распространения фронта пламени в 1-ой фазе сгорания мы смогли определит начальные условия для дальнейшего моделирования распространения фронта пламени в камере сгорания УИТ-85. Представляя обобщенные данные как литературных источников так и собственных исследований была предложена структура и эмпирической зависимости для определения средней скорости распространения фронта пламени в основной фазе сгорания, которая представлена выражением (4.3) в котором коэффициенты подобраны с помощью математического анализа экспериментальных данных.

$$U_{och} = 1,6575 \cdot \alpha \cdot \sqrt{U_{\mu}} + \sqrt{U_{\Pi,cp}} \cdot \varepsilon^{\left[-0,186\alpha - 3,51\frac{180 + \Theta_3}{180} + 3,75\right]} + U_{\mu} + U_{\mu} + U_{\mu} + \sqrt{\frac{2 \cdot U_{\Pi,cp}}{U_{\mu}}} \left[1 - \frac{U_{\mu}}{U_{\Pi,cp}} + \left(1 - e^{-\frac{U_{\Pi,cp}}{U_{\mu}}}\right)\right] , M/c$$
(4.3)

где *U_{H CH4}* - нормальная скорость распространения пламени в момент подачи искры, м/с;

 $U_{\rm п.ср}$ - средняя скорость поршня;

α – коэффициент избытка воздуха;

^{*Θ*}₃ - угол опережения зажигания, град. ПКВ;

є - степень сжатия.

4.2 Определение характеристики тепловыделения

Приведенная первой обобщенная В главе модель сгорания, характеристику тепловыделения (4.4) имеет ряд представляющая собой были неизвестных которые определены на основании анализа термодинамических процессов в цилиндре двигателя и характеристиками распространения фронта пламени.

$$\chi = 1 - e^{-a \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_{VO3}}{\varphi_Z}\right)^{m+1}}, \qquad (4.4)$$

Продолжительность процесса сгорания определялась как функция изменения средней скорости распространения фронта пламени при данной частоте вращения и условии что в конце основной фазы сгорает около 90% всей ТВС. Тогда показатель характера сгорания определяется из эмпирического выражения (4.5) зависящего от параметров распространения фронта пламени в 1-ой и основной фазах сгорания, а также частоты вращения коленчатого вала.

$$m = \frac{\ln \frac{\ln 1 - 0.1}{\ln 1 - 0.85}}{\ln \frac{0.042 \cdot n}{U_1} - \ln \frac{0.042 \cdot n}{U_1} + \frac{0.51 \cdot n}{U_{\text{OCH}}}} - 1,$$
(4.5)



Рисунок 4.1 – Характеристика тепловыделения, полученная по экспериментальным данным, режим работы 900 мин⁻¹, УОЗ=13° ПКВ. а) без водорода; б) с добавкой 15% водорода по массе топлива.

А коэффициент характеризующий полноту завершения процесса сгорания определяется по эмпирической зависимости (4.6) в зависимости от условий распространения фронта пламени в начальной и основной фазах сгорания, частоты вращения и показателя характера сгорания учитывающего степень вовлечения свежей смеси в процесс горения.

$$a = -\ln 1 - 0.1 \cdot \frac{\frac{0.51 \cdot n}{U_{\text{OCH}}} + \frac{0.084 \cdot n}{U_1}}{\frac{0.042 \cdot n}{U_1}}, \qquad (4.6)$$

Полученная эмпирическая зависимость имеет высокую сходимость с экспериментальными данными. Использование полученной зависимости позволит на стадии проектирования с минимальным числом экспериментов определять показатель характера сгорания, а, следовательно, и характеристику тепловыделения (рисунок 4.1) с учетом особенностей сгорания при добавке водорода в ТВС и изменении режимных параметров работы двигателя. Что позволит еще на стадии проектирования и доводки определять мощностные показатели работы двигателя.

4.3 Возможность оценки интенсивности тепловых процессов в поршневых ДВС по характеру изменения показателя политропы

Одной из интегральных характеристик протекания термодинамических процессов является показатель политропы, который отражает направление и интенсивность теплового потока в рассматриваемых процессах [1,2]. На рисунке 4.2 схематично представлено изменение показателя политропы и отмечены основные «условные» точки изменения поведения термодинамической системы. На участке от начала процесса сжатия до точки 1, где показатель политропы сжатия становится равен показателя, и в процессе сжатия тепловой поток от стенок цилиндра двигателя, и в процессе сжатия тепловой поток от стенок цилиндра уменьшается и становится равен 0 в

точке 1. На участке от точки 1 до точки 2 происходит теплоотвод от сжимающегося рабочего тела через стенки цилиндра. Точка 2, где показатель политропы и адиабаты опять сравниваются, характеризуется тем, что количество теплоты выделяемого в процессе сгорания становится равным количеству теплоты, уходящему через стенки цилиндров [2]. На участке от точки 2 до ВМТ, соответствующей 360° ПКВ, происходит процесс сгорания на такте сжатия и показатель политропы стремится к бесконечности, т.е. к изохорному процессу подвода теплоты, который протекает в ВМТ. На участке от ВМТ до точки 3 показатель политропы принимает отрицательные значения, характерные активному тепловыделению на такте расширения, а точка 3, где п = 0 соответствует максимальному давлению в цилиндре двигателя. На участке от точки 3 до точки 5, где показатель политропы становится равен показателю адиабаты расширения, происходит процесс догорания TBC на такте расширения, при этом в точке 4 показатель политропы становится равен 1, что характеризует изотермический процесс, т.е. количество теплоты отдаваемое в стенки цилиндра равно количеству теплоты получаемой при сгорании топлива. Участок от точки 5 и ДО процесса выпуска характеризуется зоной выполаживания, где завершаются процессы горения, и прямолинейно увеличивающимся участком, характеризующимся увеличением теплоотвода в процессе расширения, вследствие увеличения площади охлаждаемой поверхности. Таким образом, изменения показателя политропы позволяет определять характер протекающих процессов внутри цилиндра ДВС, что является актуальной задачей для выявления возможностей повышения эффективности процесса сгорания[3,4,5].

В ходе выполнения работы показатель политропы сжатия и расширения определялся по формуле (1):

$$n = \log \frac{V_2}{V_1} \quad \frac{P_1}{P_2} , \qquad (4.7)$$

где *p*₁, *V*₁ и *p*₂, *V*₂ – давление и объем в начале и в конце рассматриваемого участка индикаторной диаграммы.



Рисунок 4.2 – Схема изменения показателя политропы действительного цикла ДВС с искровым зажиганием.

Интервал между расчетными точками брался равным $\varphi_2 - \varphi_1 = 1,5$ град ПКВ исходя из точности определения положения коленчатого вала.

Таким образом показано, что анализ изменения показателя политропы в процессах сжатия, сгорания и расширения позволяет расширить наши знания о термодинамических особенностях рабочих процессов. Так можно определить условия адиабатического сжатия, т.е. зону где теплообменные процессы между стенкой и газом отсутствуют, следовательно можно предположить, что в этой зоне температура газа равна температуре стенки, а следовательно мы можем определить массу рабочего тела, что очень важно для режимов глубокого дросселирования. Можно определить окончание первой фазы сгорания и окончание всего процесса сгорания. Можно оценить изменение скорости теплоотвода в зависимости от изменения площади стенок на сжатии и расширении.

4.4 Основные выводы по анализу и обобщению основных результатов работы

В результате обобщение выявленных особенностей процесса сгорания при добавке водорода в природный газ были получены следующие результаты:

- эмпирическая зависимость для определения средней скорости распространения пламени в 1-ой фазе;
- эмпирические зависимости для определения средней скорости распространения пламени в основной фазе, с учетом особенностей процесса сгорания при добавке водорода в СПГ.
- эмпирические зависимости связывающие коэффициенты характеристики тепловыделения со средними скоростями распространения фронта пламени в 1-ой и основной фазах сгорания, для СПГ с добавкой до 15 % водорода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты работы могут быть представлены следующими выводами:

1. Получены эмпирические зависимости для определения средних скоростей распространения фронта пламени в 1-ой и основной фазах сгорания.

2. Разработан способ определения характеристики тепловыделения по скорости распространения пламени в ДВС при работе на газовоздушных смесях с добавками водорода, позволяющий прогнозировать протекание процесса сгорания в зависимости от режимных параметров работы двигателя и свойств топлива при проектировании и доводки новых ДВС.

Полученные формулы позволяют оценить влияние добавки водорода на изменение средних скоростей распространения пламени и выявить, как скажется изменение скорости распространения фронта пламени на характеристику тепловыделения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Kuwahara, K. Mixing control strategy engine performance improvement in a gasoline dir. injection engine [Текст] / К. Kuwahara, K. Ueda, H. Ando // SAE, 980158.
- Brisley, R.J. Development of advanced platinum-rhodium Catalyst for Future Emissions Requirements [Текст] / R. J. Brisley [и др.] // SAE 1999-01-3627. -1999.
- Matsumoto, T. Development of fuel-cell hybrid vehicle [Текст] / Т. Matsumoto, N. Watanabe, H. Sugiura, T. Ishikawa // SAE, 2002-01-0096. -2002. - №1.
- Sebastien, E. Investigation of hydrogen carriers for fuel-cell based transportation [Текст] / E. Sebastien [и др.] // SAE, 2002-01-0097. - 2002. -№1.
- Swabowski, S.J. Ford Hydrogen Engine Powered P 2000 Vehicle [Текст] / S.
 J. Swabowski, S. Hasekmy // SAE, 2002-01-2043. 2002. №1.
- Jehad, A.A. The effect of combustion duration on the performance and emission characteristics of propane fueled 4-stroke S.I. engines [Текст] / А. А. Jehad, H. N. Gupta, B. B. Bansal // SAE, 1232708. - 2003.
- В.Ф., 7. H.A., Каменев C.B. Хрипач Фомин B.M., Алешин Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя С термохимическим генерированием водородного топлива [Текст] || Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2006. № 4. C. 45-50.
- Рахимов, Р.Р. Улучшение показателей двигателей с искровым зажиганием путем интенсификации сгорания бедных смесей [Текст]: автореферат дис. ... кандидата технических наук / Р. Р. Рахимов. - Волгоград: ВолГТУ, 1999.

- Gerbig, F. Potentials of the hydrogen combustion engine with innovative hydrogen-specific combustion process [Текст] / F. Gerbig // Fisita World Automotive Congress, nr F2004V113. - 2004. - T. 113.
- Verhelst, S. A study of the combustion in hydrogen- fuelled internal combustion engines [Текст]: PhD thesis / S. Verhelst. - Gent: Gent University, 2005.
- Verhelst, S. Simulation of hydrogen combustion in spark-ignition engines [Teκct] / S. Verhelst, R. Sierens // 14th World Hydrogen Energy Conference. -2002.
- 12. Rottengruber, H. Potentials of a charged SI-hydrogen engine [Текст] / H. Rottengruber, M. Berckmuller // SAE. 2003. №2003-01-3210.
- Ghazi, A. K. Hydrogen as a spark ignition engine fuel [Текст] / A. K. Ghazi // International Journal of Hydrogen Energy. - 2003. - №28. - С. 569–577.
- Stockhausen, W.F. Ford P2000 hydrogen engine design and vehicle development program [Текст] / W. F. Stockhausen // SAE. - 2002. - №2002-01-0240.
- Das, L.M. Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application [Текст] / L. M. Das // International Journal of Hydrogen Energy. - 2002. - №27. - C. 479-487.
- Quader, A.A. Engine performance and emissions near the dilute limit with hydrogen enrichment using an on-board reforming strategy [Teκct] / A. A. Quader, J. E. Kirwan, M. J. Grieve // SAE. - 2003. - №2003-01-1356.
- 17. Yamin, J. Comparative study using hydrogen and gasoline as fuels: Combustion duration effect [Текст] / J. Yamin // Int. J. Energy Res. - 2006. -№30. - С. 1175-1187.
- Suwanchotchoung, N. Performance of a spark ignition dual-fueled engine using split-injection timing [Текст]: Ph.D. Thesis / N. Suwanchotchoung. -Vanderbilt University, 2003.
- Collier, T.R. Measurement of gasoline exhaust hydrogen emissions [Текст] / T. R. Collier [и др.] // SAE. - 2004. - №2004-01-0592.

- Grieve, M. J. Hydrogen leveraging for near zero-emission vehicles with conventional or mild hybrid powertrains and gasoline fuel [Текст] / M. J. Grieve. - Detroit, 1998.
- 21. Каменев В.Ф., Фомин В.М., Хрипач Н.А., Лежнев Л.Ю. Исследования энергетических и экологических показателей работы автомобильного двигателя на бензоводородных топливных композициях [Текст] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2005. № 9. С. 16-23.
- 22. Смоленский В.В. Особенности процесса сгорания в бензиновых двигателях при добавке водорода в топливно-воздушную смесь [Текст] // дис. ... канд. тех. наук : 05.04.02. Тольятти, 2007. 185 с.
- Changwei, J.I. Experimental study on combustion and emissions characteristics of a spark ignition engine blended with hydrogen [Текст] / J. I. Changwei // SAE. - 2009. - №2009-01-1923. - С. 132-154.
- 24. Quader, A.A. Engine performance and emissions near the dilute limit with hydrogen enrichment using an on-board reforming strategy [Teκct] / A.A. Quader, E.J. Kirwan, G.E. James // SAE. - 2003. - №2003-01-1356.
- White, C. A technical review of hydrogen-fuelled internal combustion engines [Текст] / C. White // California Air Resources Board ZEV Technology Symposium. - 2006.
- Wilson, T.S. High bandwidth heat transfer and optical measurements in an instrumented spark ignition internal combustion engine [Текст] / Т. S. Wilson [и др.] // SAE. 2002. №2002-01-0747.
- 27. Andersson, I. Cylinder pressure and ionization current modeling for spark ignited engines [Текст] / I. Andersson: Linkopings Universitet, 2002.
- 28. Mustafi, N.N. Spark-ignition engine perfomans with «Power-gas» fuel (mixture of CO/H2): A comparison with gasoline and natural gas [Текст] / N. N. Mustafi [и др.] 2006.

- Kemmler, R. Current status and prospects for gasoline engine emission control technology paving the way for minimal emissions [Teκct] / R. Kemmler, A. Waltner, C. Schon, S. Godwin // SAE. 2000. №2000-01-0856.
- 30. Auzins, J. Ion-gap sense in misfire detection, knock end engine control [Teκct] / J. Auzins, H. Johansson, J. Nytomt // SAE. 1998. №950004.
- 31. Будаев, С.И. Ионный ток в пламени и скорость сгорания топливновоздушной смеси в двигателе с искровым зажиганием [Текст] / С. И. Будаев, П. В. Ивашин, В. В. Смоленский, А. П. Шайкин // Современные тенденции развития автомобиле строения в России. Материалы 3-й ВНТК 26-28 мая, ТГУ. - 2004. - С. 107-112.
- 32. Tang, X. Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development [Текст] / X. Tang [и др.] // SAE. 2002. №2002-01-0242.
- 33. Berger, E. The new BMW 12-cylinder hydrogen engine as clean efficient and powerful vehicle power train [Текст] / E. Berger [и др.] // Paper presented at the Fisita 2006 World Congress, F2006P114, Yokohama. - 2006. - C. 114.
- 34. White, C.M. The hydrogen fuelled internal combustion engine: a technical review [Teκcτ] / C. M. White, R. R. Steeper, A. E. Lutz // International Journal of Hydrogen Energy. - 2006. - №31. - C. 1292-1305.
- Ciatti, S.A. Study of combustion anomalies of h2-ice with external mixture formation [Teκcτ] / S. A. Ciatti, T. Wallner // ASME Internal Combustion Engine Devision. - 2006. - №8.
- Naber, J. D. Impact of egr on combustion processes in a hydrogen fuelled si engine [Текст] / J. D. Naber, A. M. Nande, S. Szwaja // SAE. - 2008. -№08PFL-710.
- 37. MITSUBISHI MOTORS [Текст] // Technical review -2004. №16.
- Sierens, R. A hydrogen fuelled V-8 engine for city-bus application [Текст] / R. Sierens, S. Verhelst // FISITA World Automotive Congress. Seoul, Korea,. -2000. - № F2000A084.

- Danner, S. BMW hydrogen 7 series a safe way to a clean future [Текст] / S. Danner, S. Fuerst // Fisita World Congress. Yokohama, JP. - 2006. -№F2006M088.
- 40. Смоленский В.В. Смоленская Н.М., Павлов Д.А. Исследование влияния водорода на неравномерность протекания процесса сгорания СПГ в ДВС на режимах холостого хода [Текст] // Вектор науки ТГУ. 2016. № 4 (38). 52-59.
- 41. Смоленский В.В., Смоленская Н.М., Павлов Д.А. Особенности изменения показателя политропы в ДВС на режиме холостого хода [Текст] // Известия Самарского научного центра РАН, т. 18, № 4(5), 2016. С. 938-843.
- 42. Смоленская Н.М. Возможность оценки количества остаточных газов в ДВС на режимах глубокого дросселирования [Текст] // сборник XXVIII МНПК «Актуальные вопросы науки» 10.11.2016. Спутник +; М. 2016. С.184-189.
- 43. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V, Bobrovskij I., Research of polytropic exponent changing for influence evaluation of actual mixture composition on hydrocarbons concentration decreasing on deep throttling operation [TeκcT], IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 50 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/50/1/012016.
- 44. Смоленский В.В. Смоленская Н.М. Влияние добавки водорода в ТВС на характеристику тепловыделения и максимальное давление в процессе сгорания [Текст] // ж-л. Естественные и технические науки №1, 2011. М.: Спутник плюс. С. 166–172.
- 45. Смоленский В.В. Смоленская Н.М. Взаимосвязь термодинамических параметров процесса сгорания с характеристиками распространения фронта пламени для бензоводородовоздушных смесей в условиях УИТ-85 [Текст] // ж-л. Естественные и технические науки №4, 2013. М.: Спутник плюс. С. 54–59.