

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Оценка скорости распространения пламени с изменением степени сжатия и добавки водорода в условиях ДВС с искровым зажиганием»

Студент Панкратов М.М. (И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)

Научный руководитель Шайкин А.П. (И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)

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

« _____ » _____ 20__ г.

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

« _____ » _____ 20__ г.

Тольятти 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 Анализ состояние вопроса, цель и задачи исследования. Процесс сгорания в поршневых двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием.....	9
1.1 Процесс сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием	9
1.2 Обзор методов исследования процесса сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием.....	21
1.3 Метод изучения процесса сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием с помощью электропроводности пламени.....	22
1.4 Перспектива применения водорода в топливо–воздушных смесях.	27
1.5 Влияние добавки водорода на турбулентное горение.....	30
Глава 2 Описание экспериментальной одноцилиндровой установки УИТ – 85, методика обработки результатов проведённых измерений.....	33
2.1 Описание экспериментальной одноцилиндровой установки УИТ – 85.....	33
2.2 Методика проведения эксперимента.....	39
2.3 Методика обработки результатов полученных измерений.....	41
Глава 3 Обработка результатов испытаний.....	43
3.1 Результаты испытаний по ионному току второго зонда датчика.....	43
3.2 Результаты испытаний по ионному току третьего зонда датчика....	46
3.3 Результаты испытаний по скоростям и ионному току при разных степенях сжатия.....	48
Глава 4 Анализ результатов испытаний.....	51
4.1 Анализ результатов ионного тока второго зонда ионного датчика..	51
4.2 Анализ результатов ионного тока третьего зонда ионного датчика...	56
4.3 Анализ скоростей распространения пламени.....	60
Заключение.....	71
Список используемых источников.....	73

Приложение А.....	82
Приложение Б.....	83

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. На данный момент транспортные двигатели являются одними из основных потребителей углеводородного топлива в мире [6]. В связи с прогнозами уменьшения нефтяных месторождений [7] и роста заболеваний, которые вызваны загрязнением воздушной среды выхлопными газами [48, 49], принуждает органы управления различных стран к ужесточению требований по экологическим качествам автомобилей. Различные конструктивные улучшения двигателя, использование современных методов каталитической нейтрализации выхлопных газов и промышленное производство неэтилированных бензинов не дает решения всех проблем в области двигателестроения. Поэтому производители в области двигателестроения в поисках наиболее эффективных способов по улучшению экономических и экологических характеристик двигателя. Одно из многообещающих направлений по улучшению экономических и экологических характеристик является улучшение процесса сгорания с помощью изменения физико–химических свойств топливо–воздушной смеси, которое можно достичь добавив в топливо активатор. В соответствии прогнозам международного энергетического агентства бензин будет основным топливом для транспорта примерно до 2040 года [4]. Также из–за растущей популярности водородной энергетики, различные ученые [3, 33, 36, 39] рассматривают использование топливной смеси, которая состоит из бензина и водорода. Этот способ улучшения экологических и экономических характеристик поршневого двигателя внутреннего сгорания можно считать наиболее разумным с точки зрения эффективности и капиталоемкости. Чтобы определять оптимального состава топливо–воздушной смеси на различных режимах работы двигателя требуется понимать влияние на процесс сгорания. Традиционные представления физики горения описывают процесс сгорания как, сгорание топлива обосновывается турбулентной скоростью распространения пламени, которая в свою очередь

определяет воздействие турбулентности и физико–химических свойств топливо–воздушной смеси на развитие начального очага пламени при зажигании, а также на сколько долго будет проходить процесс сгорания в цикле и на процесс догорания топлива у стенок цилиндра двигателя [20, 41, 44]. Установлено, что скорость пламени, которая характеризует интенсивность процесса сгорания, может определять пределы устойчивого сгорания топливо–воздушной смеси [66]. Данная тенденция довольно актуальна в настоящее время для достижения цели снижения токсичности отработавших газов и расхода топлива [10]. К тому же есть экспериментальные подтверждения влияния скорости распространения пламени на выделения оксидов азота [58] и несгоревших углеводородов [54, 70] во время сгорания смеси топливо–воздушной смеси с водородом в поршневых двигателях. Турбулентная скорость распространения пламени определяется с помощью скорости турбулентных пульсаций движения топливо–воздушной смеси в камере сгорания и нормальной скоростью распространения пламени. В наше время нет возможности довольно точно с помощью расчетов путем определять турбулентную и нормальную скорость распространения пламени в камере сгорания поршневых двигателей, особенно если использовать химические добавки для горения. Все это говорит о том, что имеется актуальность определения ее и учёте при конструировании и доводке новых моделей двигателей, которые соответствуют современным требованиям.

Из многообразия различных способов определения видимой скорости распространения пламени наиболее распространённым и экономически выгодным является метод, который основывается на явлении ионизации пламени, то есть метод ионизационных зондов. Во фронте углеводородного пламени основным механизмом образования заряженных частиц является хемоионизация, протекающая как побочная реакция между компонентами участвующими в основных реакциях горения. Так как хемоионизация прочно имеет связь с процессом сгорания топлива, тогда можно считать, что

изменение ионного тока показывает изменения кинетики химических реакций во фронте пламени, а также, скорее всего, определяет динамику видимой скорости распространения пламени. В научной работе было обнаружено то, что с помощью массовой долей углерода в топливо–воздушной смеси и видимой скорости распространения пламени можно определить величину ионного тока. Количество углерода в топливо–воздушной смеси определяет потенциальный резерв образования радикалов C_2 , CH и CHO^+ , когда концентрация этих радикалов характеризует степень ионизации фронта пламени. Еще скорость распространения пламени характеризует интенсивность их образования во время сгорания топлива, другими словами если использовать отношение амплитуды ионного тока, который регистрируется с помощью ионизационного датчика, к доле углерода в топливо–воздушной смеси можно определить видимую скорость распространения пламени, что намного упростит и удешевит существующую методику.

Цель работы: Определение характеристик ионного тока и скоростей распространения пламени вблизи стенки камеры сгорания переменного объема при добавке водорода в топливо–воздушной смеси.

Поставленная цель достигалась путем решения следующих **задач:**

1 Провести анализ изменения скорости турбулентных пульсаций и местной скорости перемещения топливо–воздушной смеси в камере сгорания.

2 Определить в зависимости от состава смеси, скоростного режима и доли добавляемого водорода турбулентной скорости распространения и ионного тока пламени в зоне, наиболее удаленной от свечи зажигания зоны камеры сгорания и скорости распространения пламени в объеме полости 3-х ионизационного датчика.

3 Определить турбулентную и нормальную составляющую скорости распространения пламени основываясь на взаимосвязи ионного тока пламени и скоростей распространения пламени.

Объектом исследования является процесс сгорания углеводородного топлива с добавкой водорода в поршневом двигателе с искровым зажиганием.

Предметом исследования является характеристики распространения пламени углеводородного топлива с добавкой водорода в поршневом двигателе с искровым зажиганием.

Научная новизна данной работы состоит в следующем:

1 Определены турбулентные скорости распространения пламени, скорости распространения пламени в полости ионизационного датчика, а также ионные токи в зависимости от состава смеси, скоростного режима и доли добавляемого водорода, в области наиболее удаленной от свечи зажигания зоны камеры сгорания.

2 Выделены разности турбулентной скорости и скорости распространения пламени в полости ионного датчика на основе значений ионного тока пламени и скоростей распространения пламени.

Теоретическое значение работы.

Показана возможность выделения турбулентных и нормальных составляющих скорости распространения пламени на основе взаимосвязи значений ионного тока пламени со скоростями распространения пламени.

Практическое значение работы.

Результаты исследования можно использовать при проектировании и доводке двигателя внутреннего сгорания, которые используют углеводородное топливо и его смесь с водородом в различных соотношениях.

Методы исследования. В процессе исследований использовались такие методы как: экспериментальные, которые включали стендовые испытания; эмпирический анализ; статистическая обработка данных; а так же компьютерное моделирование.

Положения, выносимые на защиту.

1. Анализ изменения скорости турбулентных пульсаций и местной скорости перемещения ТВС в камерах сгорания различных конструкций в диапазонах угла поворота клеенчатого вала от начала воспламенения смеси до выделения 90% тепла.

2. Зависимости от состава смеси, скоростного режима и доли добавляемого водорода средней скорости распространения пламени до наиболее удаленной от свечи зажигания зоны камеры сгорания и скорости распространения пламени в объеме полости ионизационного датчика – свечи зажигания.

3. Зависимости от состава смеси, скоростного режима и доли добавляемого водорода турбулентной скорости распространения и ионного тока пламени в зоне, наиболее удаленной от свечи зажигания зоны камеры сгорания и скорости распространения пламени в объеме полости 3-х ионизационного датчика.

4. Определение турбулентной и нормальной составляющей скорости распространения пламени на основе взаимосвязи значений ионного тока пламени со скоростями распространения пламени.

Достоверность результатов исследования характеризуется большим количеством экспериментов, применением методов статистической обработки данных, непротиворечивостью полученных экспериментальных данных и результатов их анализа с основными положениями теории распространения пламени и с результатами экспериментов других авторов.

Реализация результатов работы.

Работа выполнялась в рамках проведения исследований, проводимых в НОЦ ТГУ «Энергоэффективные и малотоксичные ДВС и тепловые установки». Материалы работы применяются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.04.03 «Энергетическое машиностроение».

Апробация работы.

Результаты исследования были представлены на научно-технических семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета в 2018 году и доложены в следующих конференциях: научно-практическая конференция «Студенческие дни науки в ТГУ» Тольяттинский государственный университет, Тольятти – 2018.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 1 печатная работа.

Структура и объем диссертации.

Магистерская диссертации состоит из таких частей как: введение, четырех глав, заключения, списка литературы, который состоит из 76 наименований и 2 приложений. Работа описана на 85 страницах машинописного текста, иллюстрированного 11 таблицами и 15 рисунками.

ГЛАВА 1 Анализ состояние вопроса, цель и задачи исследования. Процесс сгорания в поршневых двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием.

1.1 Процесс сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием

Понимание самого процесса сгорания в внутри цилиндра поршневого бензинового двигателя основывается на фундаментальных работах по теории турбулентного пламени. Родоначальниками теории турбулентного пламени с полным основанием считаются Щелкин К.И. и Дамкеллер. В работе Дамкеллера [62] рассматривается крупномасштабная турбулентность, имеющая небольшую интенсивностью турбулентности и мелкомасштабную турбулентность имеющая большую интенсивностью турбулентности. Из этих работ можно выявить, что в пламени, в основном, присутствуют обе модели турбулентности, однако для процессов, происходящих в камере сгорания,

крупномасштабная турбулентность имеет результирующее значение. Если рассматривать крупномасштабную турбулентность, которая имеет небольшую интенсивность, в этом случае фронт пламени принимает извилистую форму, но процесс ламинарного переноса не прекращается. Фронт пламени, который был рассмотрен в работе Дамкеллера, представлен в виде схемы, которая представлена на рисунке 1.1.

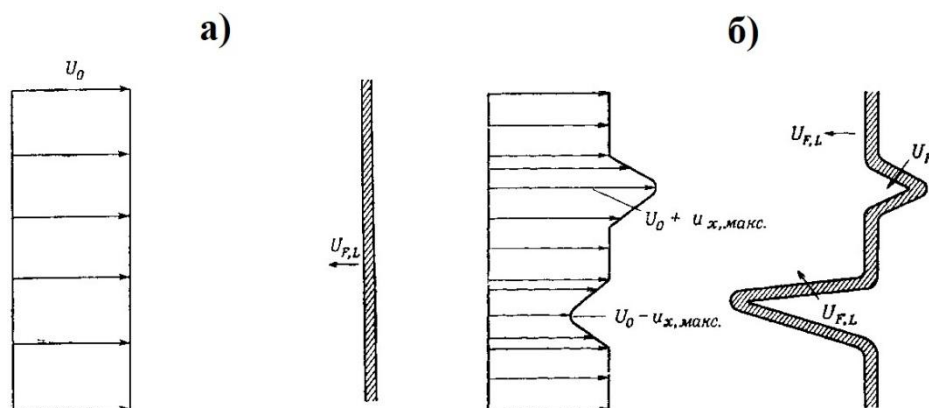


Рисунок 1.1 – Схема пламени по Дамкеллеру

а) Ламинарное пламя; б) Турбулентное пламя

Ламинарное плоское пламя распространяется с постоянной скоростью $U_0 = U_H$. Когда в потоке образуются отклонения от среднего значения скорости U_x , скорость в некоторых областях становится равной $U_0 + U_x$, тогда на поверхности фронта пламени появляются конусообразные языки пламени, которые можно сравнить с бунзеновскими племенами, при этом каждый язык пламени поддерживает ламинарную скорость распространения пламени. Противоположное движение самого пламени будет происходить только в областях фронта пламени, где скорость будет равной $U_0 - U_x$, в данном случае поверхность пламени продолжает увеличиваться из этого следует, что пространственная скорость распространения пламени будет только увеличиваться. Из вышеперечисленных соображений Дамкеллера, можно сделать следующие выводы:

– турбулентность будет наибольшей в областях фронта пламени, где имеются отрицательные отклонения от средних значений скоростей распространения пламени.

– , скорость потока должна превысить $U_o + U_x$, тогда в этом случае направление обратного движения измениться

– отклонение от средних значений скорости распространения пламени образует кривую фронта пламени.

Более подробно в своей работе Дамкеллер раскрыл теорию мелкомасштабной турбулентности с крупной интенсивностью. Он основывался на интенсивность внутреннего переноса во фронте пламени по причинам его пульсаций. Что бы описать среднюю скорость распространения турбулентного пламени Дамкеллером была предложена следующая зависимость:

$$U_T = U_H \frac{\bar{\varepsilon}}{\nu}, \quad (1.1)$$

Где U_H – нормальная скорость пламени, ε – коэффициент турбулентного обмена, ν – вязкость среды.

Он отмечает, что вышеупомянутое выражение определяет прямую зависимость скоростей пламени и возрастает с увеличением пульсационной скорости U' .

Еще одна теория о распространении пламени при крупномасштабной турбулентности была предложена Карловицким [62]. Карловицкий рассмотрел структуру турбулентного пламени и пришел к выводу, что во внутренней части фронта турбулентного пламени имеется узкий движущийся фронт, который изменяется в размерах и пульсирует целостным веществом. Карловицкий сделал выводы, что нормальная скорость распространения пламени, характеризующая продвижение фронта пламени относительно топливо–воздушной смеси, подвергается хаотичному пульсационному движению молярных объемов газа. Из этого можно предположить, что концепция нормального фронта пламени применима к процессу развития и

выгорания поверхности пламени в турбулентном потоке, но только учитывая его конечную толщину. Это ограничение можно представить в виде неравенства:

$$\frac{S_{\phi}}{V_{\text{см}}} < \frac{C_p \rho U_H}{\lambda}, \quad (1.2)$$

Где S_{ϕ} – поверхность фронта пламени, $V_{\text{см}}$ – объем свежей смеси, C_p – теплоемкость смеси; ρ – плотность смеси, λ – коэффициент теплопроводности.

Карловицкий разделив процесс развития крупномасштабной турбулентности на разные стадии, выявил следующие уравнения скоростей распространения турбулентного пламени, которые можно представить в следующем виде:

- для слабой турбулентности $\frac{U'}{U_H} \ll 1$:

$$U_T = U_H + U, \quad (1.3)$$

- для умеренной турбулентности $\frac{U'}{U_H} \approx 1$:

$$U_T = U_H + \overline{2U_H U'} + 1 - \frac{U_H}{U'} \left(1 - e^{-\frac{U'}{U_H}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.4)$$

- для сильной турбулентности $\frac{U'}{U_H} \gg 1$:

$$U_T = U_H + \overline{2U_H U'}, \quad (1.5)$$

В итоге, следуя теории турбулентного пламени, которую предложил Карловицкий, можно выделить то, что нормальная скорость распространения ламинарного пламени в частности представляет собой главный фактор, который может определяется до наивысших значений интенсивности турбулентности.

На данный момент имеющиеся представления о процессе горения в внутри пространства цилиндра поршневого бензинового двигателя, все они сформированы на экспериментальных исследованиях ученых, таких как:

Дубовик А.С., Иноземцев Н.В., Стечкин Б.С., Брозе Д.Д., Хитрин Л.Н., Щелкин К.И., Соколик А.С., Даниэль В.А., Воинов А.Н., Хейвуд, Кюри С..

Представление параметров процесса сгорания в поршневых двигателях работающих на бензине, представлен в виде графика на рисунке 1.2.

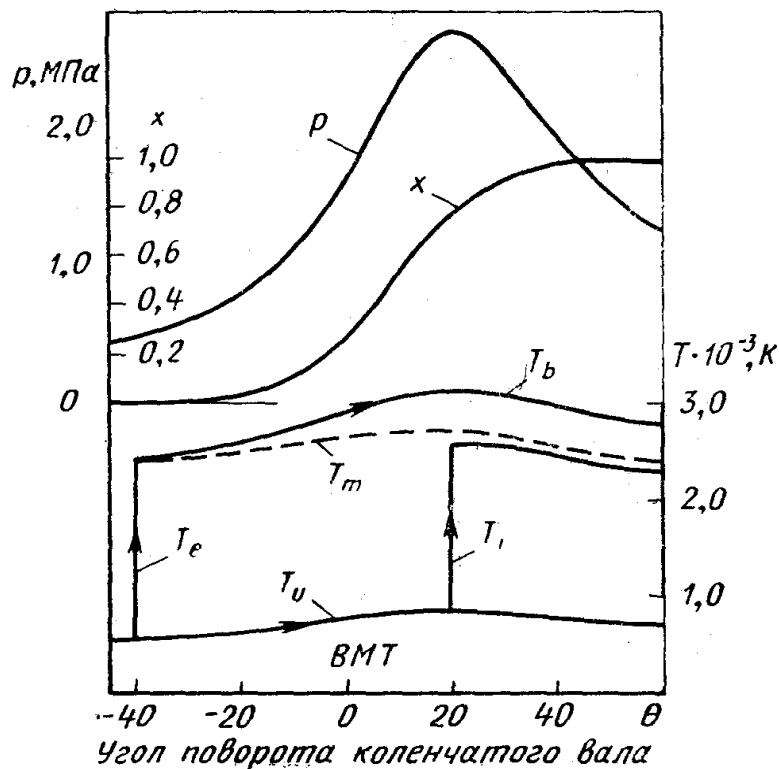


Рисунок 1.2 – Преобразование главных параметров процесса сгорания в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

Кривая p показывает как изменяется давление внутри цилиндра в зависимости от угла поворота коленчатого вала (θ). Кривая x описывает сгоревшую массовую долю рабочего заряда. Угол опережения зажигания рабочего заряда равен сорока углу поворота коленчатого вала ($\theta_z = 40^\circ$ пкв). Горение прекращается примерно около тридцати градусах поворота коленчатого вала после верхней мертвой точки ($\theta \approx 30^\circ$ пкв после ВМТ). Наиболее значительным фактором окончания времени, которое потребуется для сгорания топливо–воздушной смеси, будет различные изменения температуры в зависимости от времени для разных моментов времени сгорающих частей топливо–воздушной смеси. Что бы выяснить

распределение температуры, была рассмотрена модель неомогенности топливо–воздушной смеси, то есть отсутствует перемешивание во времени начальной стадии процесса сгорания и сгорает отдельный горящий газообразный элемент топливо–воздушной смеси при постоянных, но различных друг от друга энтальпиях и давлениях. Так же, каждый газообразный элемент топливо–воздушной смеси сжимается изэнтропически и расширяется в момент сгорания последней части топливо–воздушной смеси и в момент движения поршня вниз.

Определенные по данной модели характерные изменения температуры двух элементов газа в зависимости от угла поворота коленчатого вала так же представлены на графике, который можно увидеть на рисунке 1.2. Сначала в первой фазе цикла сгорает один газообразный, далее сгорает второй газообразный элемент, который можно увидеть на данном графике, кривая T_l . T_m – средняя температура сгоревшего газа. Температура T_u соответствует изэнтропическому сжатию несгоревшей топливо–воздушной смеси. Имеется существенный температурный градиент, где максимальная температура топливо–воздушной смеси, сгорающая раньше, примерно на 500 К выше температуры топливо–воздушной смеси, сгорающего позже, так как скорость химической реакции зависит от температуры, то такие различия среди температур могут повлиять на концентрацию NO_x в ОГ, в частности на их порядок.

В научных работах [44, 46, 51, 59, 62, 63] было сказано о том, что условия при котором распространяется фронт пламени в двигателе в целом имеет соответствие турбулентному процессу горения, но в связи с тем, что данный процесс довольно сложный, предоставить какую–либо однозначную характеристику процесса сгорания по всей его продолжительности имеет маловероятную возможность, в связи с этим многие ученые придерживаются методу разделения процесса горения на три фазы [68]:

Фаза I, начальная – в процессе данной фазы происходит возникновение с дельнейшим формированием источника пламени. Фазу I можно определить

с помощью отрезка времени, который зависит от момента пробоя искрового промежутка в свечи зажигания до момента видимого повышения давления в цилиндре, который виден на индикаторной диаграмме, и зависит от физико-химических свойств топливо-воздушной смеси.

Фаза II, основная – в процессе фазы II, фронта пламени, который уже полностью сформирован, распространяется интенсивно по большей части объема камеры сгорания, ко всему этому в цилиндре двигателя достигаются максимальные значения по давлению.

Фаза III, заключительная – в данной фазе фронт пламени перестает свое распространение в камере сгорания, так же догорают отдельные турбулентные моли, как за фронтом пламени, так и в пристеночных слоях. Фазу III можно охарактеризовать максимальной температурой цикла при значительном снижении давления в цилиндре.

Исследования Соколика А.С. [68] дают одно из важных представлений о процессе сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием. Эксперимент имел следующую методику: процесс сгорания регистрировался на фотопленку через систему щелей в головке блока цилиндра. Экспериментальную оценку значений видимой скорости распространения фронта пламени $U_{пл}$ и доли выгоревшего объема топливо-воздушной смеси V от угла поворота коленчатого вала $\varphi(^{\circ}ПКВ)$, можно наблюдать на графике, который представлен на рисунке 1.3.

Эксперименты проводились на частотах вращения коленчатого вала $n = 400 \div 1600 \text{ мин}^{-1}$, степенях сжатия $\varepsilon = 6 \div 10$, составе топливо-воздушной смеси $\alpha = 0.6 \div 1.3$.

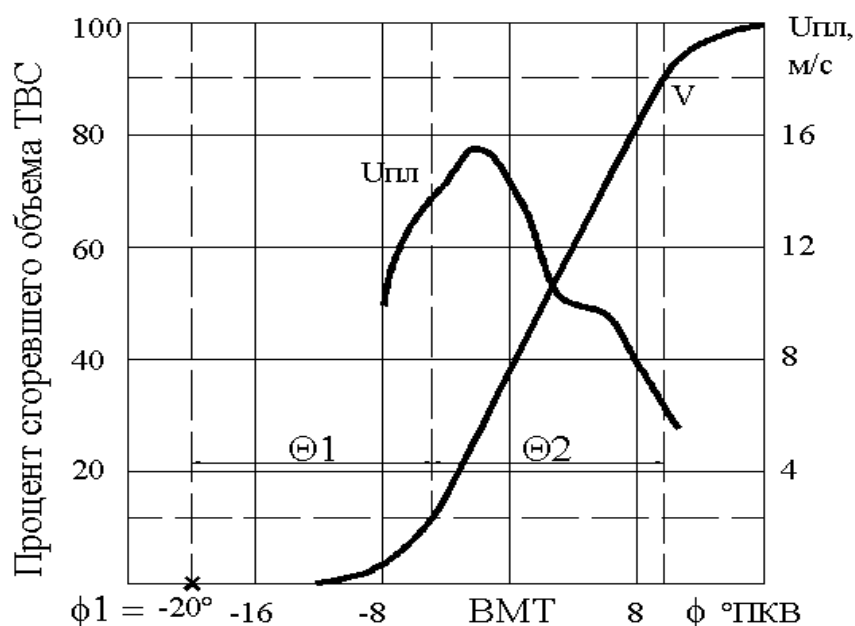


Рисунок 1.3 – График экспериментальной оценки значений видимой скорости распространения фронта пламени $U_{пл}$ и доли выгоревшего объема топливо–воздушной смеси в зависимости от угла поворота коленчатого вала ϕ (° ПКВ).

Из графика можно увидеть, что значение максимальной скорости распространения фронта пламени располагается рядом с верхней мертвой точкой и $U_{пл} \approx 16$ м/с. Так же можно увидеть, что сначала идет интенсивный рост кривой процента выгоревшего объема, затем идет рост с постоянной скоростью и в конце протекает участок замедления. Соколик А.С. определил отрезок Θ_I как начальную фазу процесса сгорания, тогда как отрезок Θ_{II} – это основная фаза, которая определяет линейный участок графической зависимости доли выгоревшего объема топливо–воздушной смеси, где объем выгоревшей топливо–воздушной смеси изменяется примерно от 13% до 90%. В той части характеристической кривой, где доли выгоревшего объема топливо–воздушной смеси меняется от 90 до 100%, можно считать завершающей фазой процесса сгорания.

Соколик А.С. проведя анализ собственной работы [68], указывает на то, что разница между отдельными фазами сгорания заключается не в том, что в

одной фазе имеет влияние только скоростного режима, другими словами завихрения заряда, а в другой фазе имеет влияние только физико-химических свойств топливо–воздушной смеси, но и также будут оказывать влияние турбулентные и физико–химические факторы для каждой фазы процесса сгорания, но при этом механизм воздействия этих факторов на сгорание будет отличаться и соответственно будут отличаться и количественные зависимости.

Он так же обращает внимание на то, что процесс распространения пламени есть определяющий процесс во всем сгорании поршневых двигателей. Он считает, что фронт пламени, который развивается от источника зажигания проходит через ламинарное пламени или пламя с мелкомасштабной турбулентностью и имеет конец, когда пламя будет иметь характерно турбулентный характер.

Исходя из известных работ [42, 43, 44, 46, 51, 59, 60, 62] можно сказать, что процесс сгорания в первой фазе будет обуславливаться мелкомасштабным турбулентным горением в целом, другими словами горением, турбулентность, которая имеет небольшие размеры в сравнении с шириной зоны нормального пламени, ее значение будет сводится к сужению ширины зоны горения. Кроме того, мелкомасштабная турбулентность будет увеличивать перенос теплоты и веществ внутри зоны горения, что способствует увеличению нормальной скорости распространения фронта пламени. Выше сказанный результат можно определить, как отличие механизма воздействия турбулентности имеет разделение всего процесса сгорания на отдельные фазы. Щелкин К.И. в своих исследованиях [76] акцентирует внимание на том, что объективно выделять первоначальную фазу горения в двигателе как, формирующийся фронт турбулентного пламени, как фазу, где размеры пламени достигают ширины зоны турбулентного горения, и горение конкретно имеет отличие от сгорания в последующей фазе. На основе исследований и экспериментов в области определения момента перехода начальной фазы в основную, в работах [68,

76] можно выделить то, что переходный процесс происходит при выгорании 10–15% объема всех топливо–воздушной смеси, или в момент разлучения кривой видимого повышения давления от кривой сжатия на индикаторной диаграмме. В фазе I скорость распространения фронта пламени имеет близкие значения со скоростью ламинарного пламени, далее, при помощи воздействия мелкомасштабной турбулентности, скорость распространения фронта пламени начинает увеличиваться. Скорость горения мелкомасштабной турбулентности имеет зависимость от нормальной скорости пламени, а также коэффициентов турбулентной и молекулярной диффузии. Данную зависимость можно представить в виде:

$$U_T \sim U_H \sqrt{1 + \frac{\chi_T}{\chi_M}}, \quad (1.6)$$

Где U_H – нормальная скорость пламени, χ_T – коэффициент турбулентной диффузии, χ_M – коэффициент молекулярной диффузии.

Еще можно выделить то, что интенсивность турбулентного переноса в цилиндре двигателя пропорциональна частоте вращения коленчатого вала, а продолжительность фазы I Θ_I (°ПКВ) будет изменяться почти пропорционально \bar{n} и будет значительно зависит от физико–химических свойств топливо–воздушной смеси, а также степени разбавления остаточными газами топливо–воздушной смеси. Тогда вышперечисленные ученые предполагают данную эмпирическую зависимость, которая определяет длительность сгорания фазы I:

$$\Theta_I \approx U_H \bar{n}, \quad (1.7)$$

Скорость распространения фронта пламени в фазе II полость зависит от закономерностей крупномасштабного турбулентного горения [68], К тому же масштаб турбулентности намного крупнее ширины зоны нормального сгорания, что содействует росту поверхности пламени. Крупномасштабная турбулентность перемещает целый пламенный очаг до того момента, когда он достигнет достаточных размеров для раздробления на части.

Мелкомасштабная турбулентность ослабевает с момента развития скорости распространения фронта пламени. С этого времени при сгорании топливо–воздушной смеси важным и характеризующим параметром является крупномасштабная турбулентность. В научных работах [57, 60, 62, 67] сказано о том, что средняя скорость распространения фронта пламени в основной фазе пропорциональна числу оборотов коленчатого вала, то есть $U_T \sim n$.

Скорость распространения пламени исходя из теории турбулентного горения [76] можно описывать эмпирической зависимостью:

$$U_T = U_H \sqrt{1 + B \frac{U'^2}{U_H}}, \quad (1.8)$$

где U' – пульсационная скорость турбулентного потока, B – константа.

Упрощённый вид выражения для скорости турбулентного распространения пламени имеет вид:

$$U_T \approx U_H + BU', \quad (1.9)$$

при крупномасштабной турбулентности:

$$U_T \approx U', \quad (1.10)$$

Состав топливо–воздушной смеси, а также частота вращения коленчатого вала дает влияние на длительность второй фазы сгорания Θ_{II} , она становится значительно слабее, исходя из этого длительность второй фазы полностью определяется скоростями турбулентных пульсаций [68].

В конечной фазе аналогично начальной процесс сгорания проходит по законам мелкомасштабного турбулентного горения, где скорость значительно зависит от физико–химических свойств топливо–воздушной смеси. Так же происходит возобновление влияния частоты вращения коленчатого вала. К тому же, физико–химические свойства топливо–воздушной смеси дают возможность определять скорость догорания отдельных молей за фронтом пламени. В близости у стенок камеры сгорания, а так же днища поршня масштабы и скорости турбулентных пульсаций

имеют меньшие значения, чем в основном объеме, поэтому скорость распространения пламени с приближением к стенкам уменьшается [57, 60].

В научных работах [52, 62, 67, 68] было представлено то, что скорость распространения фронта пламени при мелкомасштабной турбулентности пропорциональна нормальной скорости распространения пламени. Тогда нормальная скорость зависит от физико–химических свойств топливо–воздушной смеси, тогда ее можно представить в виде формулы:

$$U_T \sim U_H, \quad (1.11)$$

$$U_H = \frac{\alpha}{t_p} \quad (1.12)$$

где α – коэффициент температуропроводности, t_p – время сгорания топливо–воздушной смеси в ламинарном фронте пламени.

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \rho} = \frac{\lambda RT}{C_p \rho}, \quad (1.13)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, C_p – теплоемкость топливо–воздушной смеси.

Из сказанного можно отметить то, что нормальная скорость распространения фронта пламени U_H пропорциональна температуре процесса сгорания, которая оказывает характеризующее воздействие на образование оксидов азота. Это говорит о том, что должна быть связь между выделениями оксидов азота в отработавших газах и средней скоростью распространения фронта пламени топливо–воздушной смеси в поршневом двигателе с искровым зажиганием.

Рассмотренные особенности сгорания топливо–воздушной смеси в поршневом двигателе с искровым зажиганием являются важным фактором в определении эффективности работы двигателя и механизмов образования вредных веществ.

1.2 Обзор методов исследования процесса сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием

Развитие техники в середине XX столетия дало толчок для развития науки, в частности области горения. Развитие теории горения непрерывно связано с экспериментальными методами исследования процесса сгорания. Методы, направленные на изучение процесса сгорания весьма разнообразны. Данные методы основаны на разного рода физических явлениях.

Измерение давления в цилиндре двигателя, другими словами индицирование, наиболее известный способ изучения процесса сгорания экспериментальным путем. С помощью индикаторной диаграммы можно получить интегральную характеристику процесса сгорания, с помощью которой можно будет оценить работу самого цикла, а также такие параметры как его эффективность и нестабильность [63]. При снятии индикаторной диаграммы при каждом рабочем цикле каждого отдельного цилиндра двигателя и согласной ей обработки информации, эта характеристика с наивысшей точностью подходит для систем электронного управления рабочим процессом. Однако это невозможно в массовом производстве при современном уровне развития техники [64]. К тому же с помощью данных характеристик невозможно получить информацию о точечном протекании процесса сгорания в различных зонах камер сгорания.

В экспериментальной практике наиболее часто применялись оптические методы, в связи с необходимостью в изучении быстротекущих процессов сгорания. К подобным экспериментам можно отнести высокоскоростную съемку распространения фронта пламени [57, 37], шпирен-фотографию [67], многощелевую фоторазвертку [62]. К классическим методам можно отнести, например, изучение процесса сгорания в бомбах постоянного объема и постоянного давления [44]. С развитием науки в наши дни при исследовании применяют такие методы как: спектрального анализа, лазерная диагностика [31], измерение температуры

пламени, а также диагностика процесса сгорания с применением явления электропроводности пламени [69].

Рассмотрим по подробнее метод лазерной диагностики. В работах [29, 31] говорится о том, что применяя лазер, мы будем ограничиваться лабораторными условиям. Данный метод основывается на эффекте поглощения инфракрасного излучения углеводородами, что дает возможность получать точную квазиобъемную информацию о развитии основных стадий процесса сгорания.

Большая необходимость в изучении процесса сгорания в внутри цилиндра двигателя, как сказано в работе [65], является причиной в развитии фундаментальных исследований гомогенного турбулентного горения для того чтобы создавать экономичные и экологичные двигатели с сохранением или развитием мощностных показателей на высоком уровне.

Методы изучения процесса сгорания, которые представлены ранее в основном применяются для экспериментальной диагностики и далее численного моделирования, но данные методы вызывают достаточно трудностей для применения данных методов в системах контроля и управления работы двигателя, из-за своей большой сложности и стоимости. Эти недостатки можно избежать в процессе изучения сгорания применив метод ионизации, то есть использовать явление электропроводности пламени.

1.3 Метод изучения процесса сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием с помощью электропроводности пламени.

Умение пламени проводить электрический ток, когда подается напряжение на электроды измерительного зонда, давно известный факт. Явление электропроводности, другими словами ионизации, пламени, которое было открыто в XIX веке впоследствии уже в середине XX столетия привело к изучению процесса ионообразования в пламени и к использованию данного

явления в качестве средства для подробного исследования и анализа сложного физико–химического процесса сгорания [68]. Многочисленные эксперименты, которые проводились на различных горелках, а также в бомбах постоянного давления и постоянного объема с применением явления электропроводности пламени принесли неоценимые научные наработки, которые дали возможность для возобновления исследований и глубокого понимания процессов горения в камерах сгорания тепловых двигателей и установок.

Из многих методов диагностики процесса сгорания, зондовые методы измерения ионизации с помощью датчика ионизации остаются довольно простыми, надежным и дешевым средством в процессе изучения горения углеводородного топлива.

Почти все ученые в этой области указывают на аномально высокую концентрацию заряженных частиц во фронте пламени, которая присуща в частности углеводородным топливам. Опыты с использованием сферической бомбы с центральным зажиганием с предварительно перемешанным топливом и воздухом приведенных дают результаты, которые представлены в работе, того что величина ионного тока в момент прохождения фронта пламени через электроды ионного датчика резко увеличивается, а после прохождения фронта пламени снижается, несмотря на непрерывное увеличение температуры и давления за зоной горения.

Это обосновывается различными исследованиями [69], которые проводились с помощью горелки Бунзена. Характерное распределение тока проводимости и его распределение температур по радиусу поперечных сечений пламени представлено на рисунке 1.4. Если сравнить характер распределения тока проводимости и распределение температур можно выделить то, что максимальное значения тока проводимости находится в области III сечения, после чего замечается снижение электропроводности, при этом максимальные температуры располагается в области VI сечения, другими словами за фронтом пламени в зоне догорания. Следствия, которые

вынесли вышеупомянутые ученые ведут к единому мнению о том, что в зоне горения ионизация имеет не термическую природу, а связана целюно с химическим процессом превращений (хемионизация).

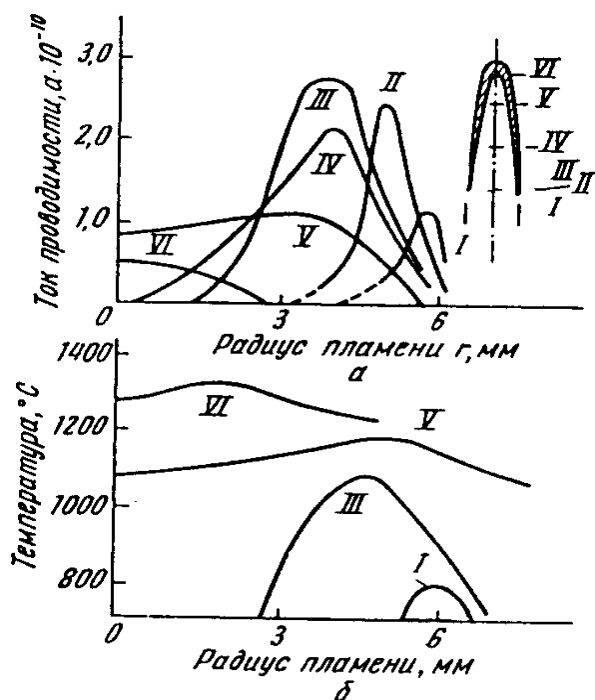


Рисунок 1.4 – Распределение тока проводимости и температуры по радиусу поперечных сечений пламени.

Процесс сгорания за исключением хемионизации, так же имеет еще понятие термоионизация, которая имеет зависимость от протекания химической реакции, а так же ее можно наблюдать непосредственно во фронте пламени. В работе [56] при помощи расчетов был определен эффективный потенциал ионизации. Можно предположить, что он имеет соответствие с потенциалом ионизации конечных продуктов сгорания. На основе этих предположений можно выразить и доказать термическую природу ионизации в зоне продуктов сгорания. Ко всему этому еще можно указать на превышение в несколько порядков, концентрации электронов во фронте пламени относительно концентрации электронов в зоне продуктов сгорания. На рисунке 1.5 представлен пример осциллограммы тока проводимости, которую можно получить при изучении процесса сгорания, как например в работах [54, 2, 18, 32].

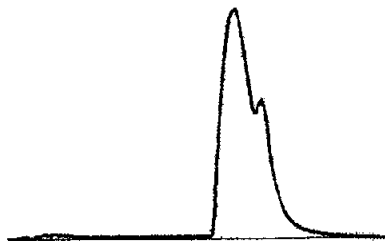


Рисунок 1.5 – Пример характерного импульса ионного датчика.

В данной работе были определена зависимость величины концентрации электронов от коэффициента избытка воздуха.

Направление изменения концентрации электронов от коэффициента избытка воздуха, другими словами сам состава топливо–воздушной смеси, пропорционален изменениям средней скорости распространения фронта пламени от состава топливо–воздушной смеси, что можно наблюдать на графиках, которые представлены на рисунке 1.6. В связи с этим можно определить среднюю скорость распространения фронта пламени по величине ионного тока при изменении состава топливо–воздушной смеси.

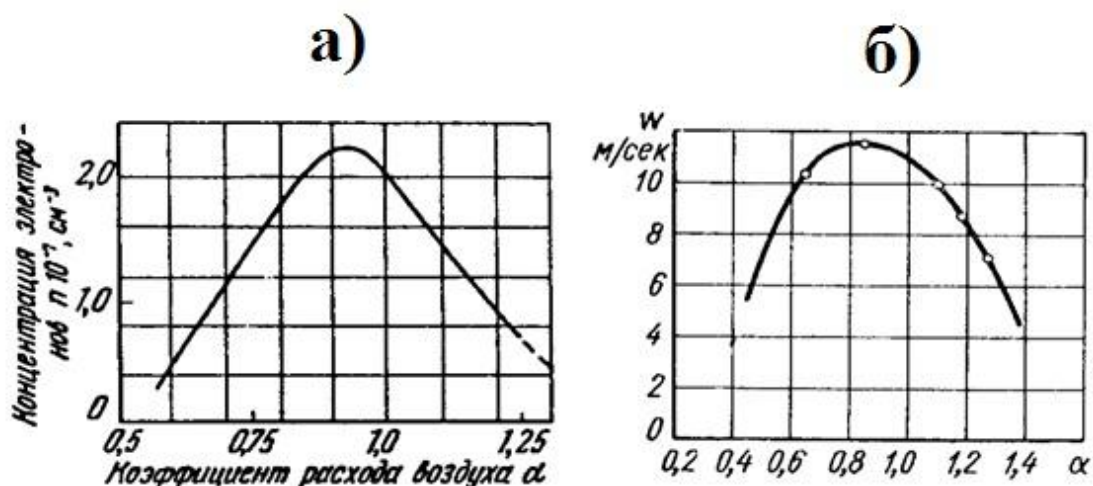


Рисунок 1.6 – Графики зависимостей концентрации электронов и средней скорости распространения фронта пламени от состава смеси.

а) Зависимость концентрации электронов от состава смеси

б) Зависимость средней скорости распространения фронта пламени от состава смеси

Нахождение концентрации токсичных составляющих в продуктах сгорания углеводородного топлива в двигателе внутреннего сгорания за счет величины ионного тока подтверждают такие работы как [55, 56, 71, 72, 74, 75]. В этих работах так же сказано, что оценивать состав топливо–воздушной смеси и контролировать выделение главных составляющих отработавших газов можно с помощью явления электропроводности пламени в камере сгорания поршневого двигателя.

Метод измерения тока проводимости пламени с помощью зонда, который упоминался ранее, владеет различными неоспоримыми преимуществами такими как: довольна простая конструкция, малая стоимость, применение этого метода без значительных изменений в конструкции силовой установки. Исследование процесса сгорания в поршневых двигателях опытным путем с помощью ионного датчика дает возможность находить такие параметры как: характеристику сгорания, контуры и так же среднюю скорость распространения фронта пламени. Это объясняет выросший интерес использования этого метода при исследовании процесса сгорания, что доказывает множество современных публикаций.

Инженерами в Лундском технологическом институте [38] были проведены различные исследования в сфере изучения точечных значений соотношения воздух/топливо. Костяк данной работы заключался в том, что свеча накаливания работает очень маленькое время, что привело к расширению функций в направлении по определению электропроводности пламени, другими словами можно сказать, что свеча накаливания используется как ионный датчик. Метод заключался в том, что подавалось напряжение на свечу накаливания, после искрового разряда, и по этому напряжению проводилась оценка протекания ионного тока. Два пика проводимости были выявлены процессе исследования. Ученые предполагают то, что большой пик связан с химионизацией, когда пик размером меньше растет из термоионизации непосредственно в зоне продуктов сгорания. К тому же можно добавить, что при помощи системы с ионизационным

датчиком можно создавать общую картину распространения фронта пламени во внутрицилиндровом пространстве двигателя, а также определять скорости сгорания топливо–воздушной смеси.

1.4 Перспектива применения водорода в топливо–воздушных смесях.

На данный момент во многих странах мира проводятся исследования в сфере влияния водорода в топливо–воздушной смеси на показатели двигателя [40, 50, 61 1, 8, 13 – 16, 20, 21 – 26, 27, 28]. Например, в Америке были проведены исследования, в которых в автомобиле Ford–150 была применена смесь водорода и сжиженный природный газ (30% по объему) [20]. При этом исследовании было замечено снижение токсичности отработавших газов в частности по концентрациям NO_x и CO , хотя так же было замечено, что отсутствует реакция эмиссии CH на водород, что можно наблюдать на диаграмме, которая показана на рисунке 1.7. Впрочем, есть результаты [9] которые говорят о том, что при добавке водорода в сжиженный природный газ приводит к снижению не только концентрации NO_x и CO , но и замечено снижение концентрации CH .

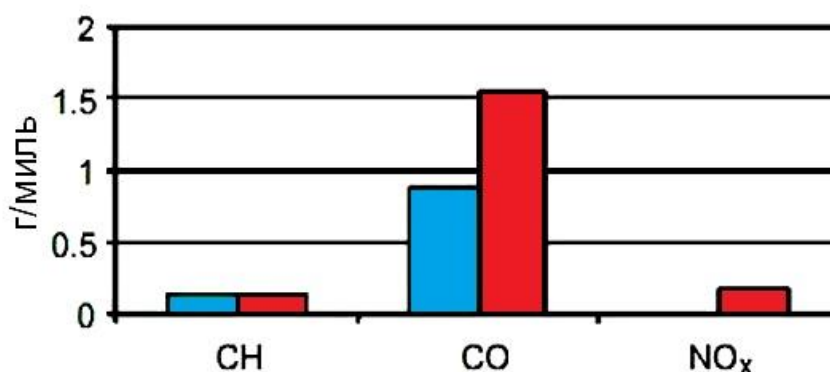


Рисунок 1.7 – Диаграмма токсичности отработавших газов двигателя работающим на бензине и смеси водорода и бензина

Синяя диаграмма – Смесь сжиженный природный газ с водородом;

Красная диаграмма – Бензин.

Так же похожие исследования были проведены в Китае. В этой стране с недавних пор активно проводятся действия по внедрению смеси сжиженного природного газа с водородом для городских автобусов [26]. Местными учеными был проведен анализ токсичных компонентов городских автобусов. Сравнение автобусов, которые используют в качестве топлива сжиженный природный газ, с автобусами, работающими на смеси сжиженного природного газа с водородом, показало то, что автобусы на смеси сжиженного природного газа с водородом имеют наилучшие показатели по токсичности отработавших газов. Результаты сравнения токсичности можно наблюдать в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты сравнения токсичности автобусов, которые работают на смеси сжиженного природного газа с водородом и просто сжиженном природном газе.

Вид топлива	Концентрация токсичности отработавших газов			
	NO _x (г/кВт·ч)	CO (г/кВт·ч)	NMHC (г/кВт·ч)	CH ₄ (г/кВт·ч)
Сжиженный природный газ	3.5	4.0	0.55	1.1
Смесь сжиженный природный газ с водородом	2.5	0.04	0.23	0.22

Исследования на технико-экологические показатели двигателя при добавке водорода были проведены в работе [17]. Двигатель Tata 4SP с сжиженного природного газ был переведен на смесь сжиженного природного газ с водородом. Далее при помощи экспериментальных исследований, было выявлено, что при добавке водорода в 5% дает улучшение техника-экологических показателей, в частности таких как: увеличение мощности примерно на 4%, что можно наблюдать на графике, который показан на рисунке 2.8, уменьшение показателя расхода топлива в размере 4%. Так же наблюдалось снижение токсичности, в частности: концентрации монооксида углерода примерно на 40%, снижение неметановых углеводородов на

примерно на 45% и оксида азота примерно на 25%.

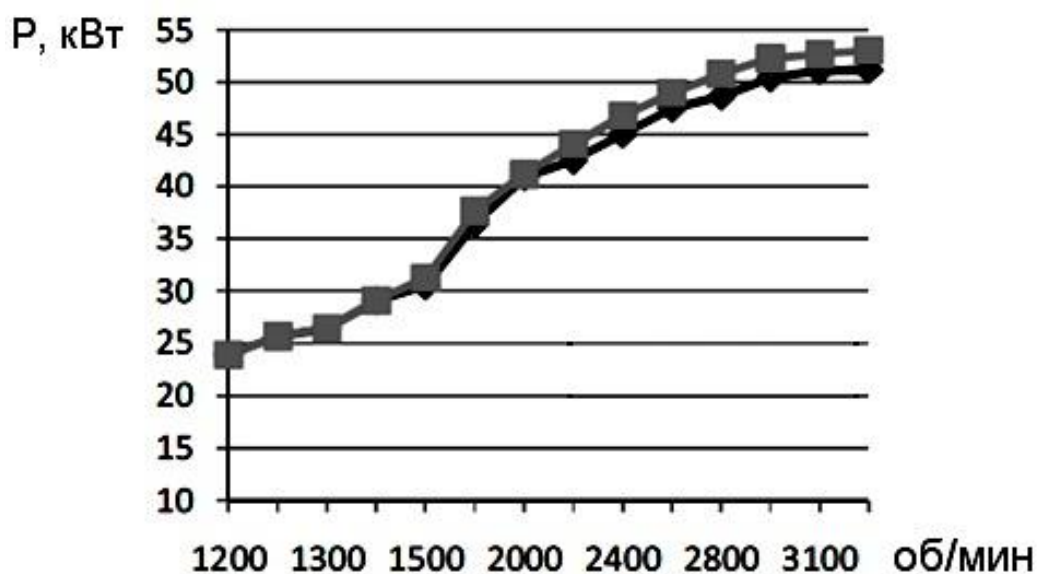


Рисунок 1.8 – Сравнение мощностей двигателя.

Серая линия – Смесь сжиженного природного газа с водородом; Черная линия – Сжиженный природный газ.

Также добавка водорода имеет влияние на ионный ток во фронте пламени, что можно на графике измеренный с помощью датчика–свечи, который показан на рисунке 1.9 [11]. Измерения проводились при оборотах коленчатого вала в 3000 мин^{-1} , коэффициенте избытка воздуха равной 1 и углу опережения зажигания 27° .

Из графика можно отметить то, что амплитуда ионного тока при сгорании метановоздушного топлива значительно меньше, чем при сгорании бензовоздушного топлива. С добавкой водорода идет увеличение ионного тока. Основание для этого может служить в зависимости электропроводности фронта углеводородного пламени от концентрации радикалов СНО^+ и ОН^- , являющиеся источниками $\text{Н}_3\text{О}^+$. Поскольку процесс образования СНО^+ и ОН^- в метановоздушном пламени протекает медленнее, нежели в бензовоздушном пламени, то добавление водорода способствует интенсификации процесса образования СНО^+ и ОН^- и как следствие

увеличивает значение ионного тока [11].

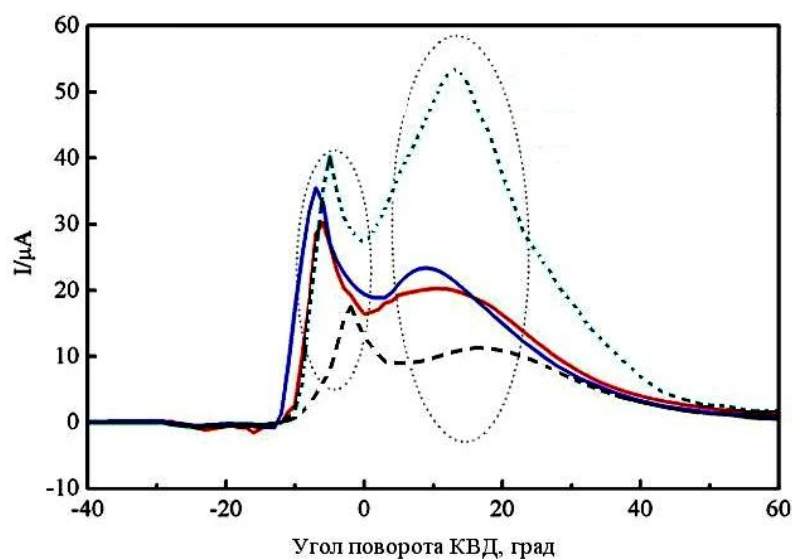


Рисунок 1.9 – Влияние различных топлив на величину ионного тока во фронте пламени.

Черная линия – Сжиженный природный газ; Красная линия – Смесь сжиженного природного газа с водородом в 20%; Синяя линия – Смесь сжиженного природного газа с водородом в 40%; Голубая линия – Бензин;

1.5 Влияние добавки водорода на турбулентное горение.

Влияние добавки водорода на турбулентное горение было проведено в работе [73]. Исследования были проведены на одноцилиндровой установке УИТ – 85.

Вследствие того, что скоростью распространения пламени определяется ширина зоны турбулентного горения, тогда в этом случае имеет место рассмотрение изменения скорости пламени в зонах у стенки камеры сгорания, которая находится на наиболее удаленном расстоянии от свечи зажигания. Так же в этом случае стоит учитывать, что местная турбулентная скорость распространения пламени чрезвычайно чувствительна к добавкам водорода в процессе сгорания топливо–воздушной смеси у стенки цилиндра. Эффект от добавки водорода имеет место при обеднении топливо–воздушной

смеси. Было замечено, что на режиме частоты вращения коленчатого вала в 600 мин^{-1} при коэффициенте избытка воздуха 1 добавка водорода в 5% дает увеличение скорости распространения пламени примерно на 12,4%, а на том же режиме при коэффициенте избытка воздуха 1,3 наблюдается увеличение уже на 34%. Похожую картину можно увидеть и на режиме частоты вращения коленчатого вала 900 мин^{-1} . В связи с тем, что на постоянных оборотах турбулентность рабочего тела не имеет изменений, тогда можно говорить о том, что рост турбулентной скорости распространения пламени происходит за счет роста нормальной составляющей.

Так же при добавке водорода наблюдается заметное сокращение зоны турбулентного горения, преимущественно на обедненных смесях. Это объясняется увеличением нормальной составляющей скорости распространения пламени, которая показывает интенсивность переработки химическими реакциями топлива в зоне горения, то есть чем будет выше нормальная скорость распространения пламени, тем быстрее будет идти окисление топлива и соответственно сократится длина зоны горения. Вдобавок увеличение обеднения смеси дает эффект, при котором наблюдается уменьшение ширины зоны турбулентного горения. В этом случае при коэффициенте избытка воздуха равным 1 добавка водорода в 5% приведет к уменьшению ширины зоны турбулентного горения на примерно 24%, а при коэффициенте избытка воздуха равным 1,3 уменьшение составит 36%. При рассмотрении положения передней и задней границ зоны горения относительно пика ионного тока было замечено то, что передняя граница относительно пика ионного тока имеет лишь незначительные изменения, когда основные изменения происходят за пиком ионного тока, другими словами за счет заднего фронта пламени происходит увеличение ширины зоны турбулентного горения.

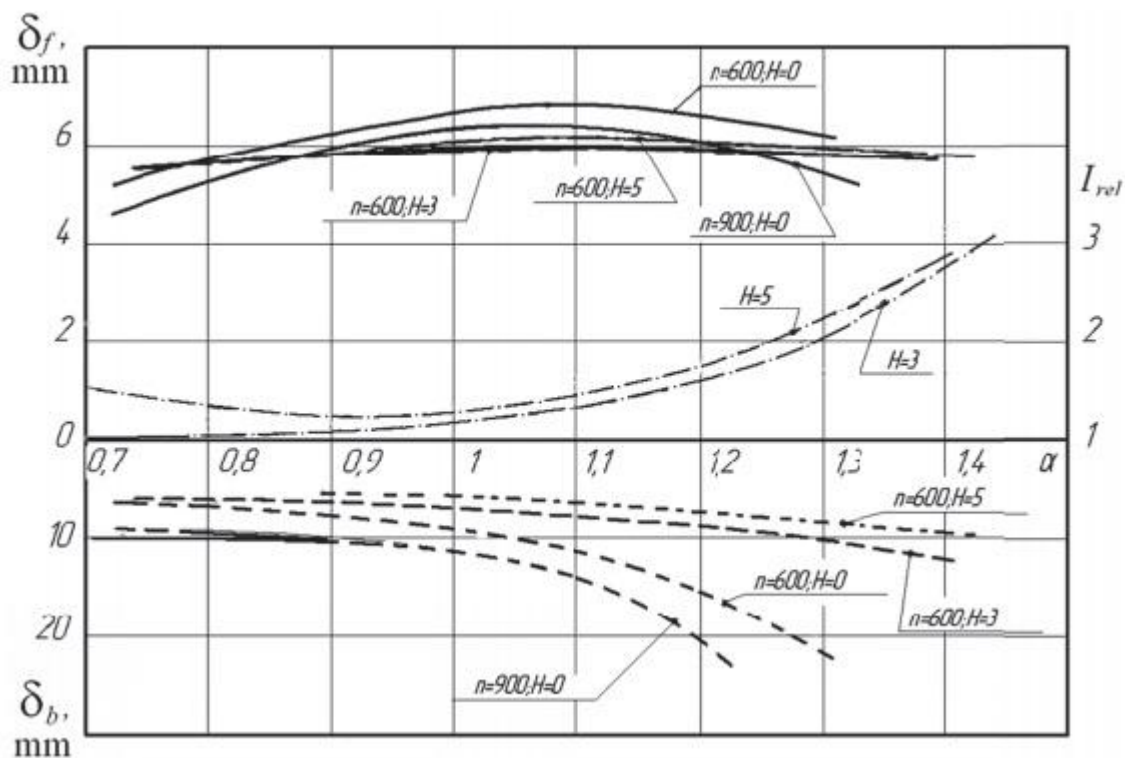


Рисунок 1.10 – Графики зависимостей различных границ зон турбулентно горения относительно пика ионного тока.

--- -- Ионный ток.

--- -- Задний фронт пламени.

— -- Передний фронт пламени.

H – Процент добавки водорода в топливо–воздушной смеси.

Из графика, который представлен на рисунке 1.10, можно наблюдать так же то, что при добавке водорода имеет место увеличение ионного тока, который возрастает с обеднением смеси, сто есть при нормальной скорости распространения пламени. Сокращение ширины зоны турбулентного горения при добавке водорода сопровождается увеличением ионного тока. К тому же можно предположить, что данная связь имеет линейный характер. Это говорит о том, что при коэффициенте избытка воздуха равным 1,3 ионный ток с добавкой водорода имеет увеличение в два раза, что сопутствует уменьшению длины задней зоны турбулентного горения относительно пика так же в два раза.

Проведя анализ первой главы и обзор данных из литературы можно сказать следующее:

3 Предоставить какую–либо однозначную характеристику процессу сгорания по всей его продолжительности не имеет возможности из–за его сложности, что говорит о перспективах в дальнейшем изучении данной темы.

4 Метод измерения тока проводимости пламени с помощью зонда имеет различные преимущества, в частности простату и дешевизну, что дает возможность большую простату и возможность в изучении процесса сгорания.

5 Использование в двигателях топлив на основе смеси сжиженного природного газа с водородом имеет перспективы, в частности улучшает технико–экологические характеристики.

6 Добавка водорода ведет к уменьшению зоны турбулентного горения, что говорит о лучшем протекании процесса горения, которая в частности влияет на экологические и мощностные параметры двигателя.

Глава 2 Описание экспериментальной одноцилиндровой установки УИТ – 85, методика обработки результатов проведённых измерений.

2.1 Описание экспериментальной одноцилиндровой установки УИТ – 85.

На данный момент известно большое количество способов изучения внутрицилиндровых процессов двигателя внутреннего сгорания, в том числе. процесса сгорания. Что бы изучить процессы сгорания и распространения пламени в камере сгорания двигателя используются разные методы регистрации положения фронта пламени. Такие методы основаны на различных физических явлениях. К примеру, используют методы высокоскоростной фотосъёмки, киносъёмки в цвете процесса

распространения пламени, регистрации пламени с использованием специальной головки цилиндра, оснащенной системой щелей и т.д.

Эти методы как правило дорогие и требуют объемных изменений в конструкции двигателей или использования специального исследовательского оборудования. Кроме этого, есть дешевые способы для изучения процессов сгорания в цилиндре двигателя, основанные на явлении электрической проводимости углеводородного пламени. В этом случае применяются различные ионизационные датчики и их системы.

Обычно углубленное рассмотрение процесса горения производят на специализированных установках, а не на автомобильных двигателях. В таких специализированных установках рабочий процесс имеет вид одиночных циклов. При таком процессе можно с большей точностью иметь контроль над параметрами сгорания, а так же изменять их независимо друг от друга, например такие параметры как: состав топливо–воздушной смеси, давление, температура стенки цилиндра, температура сжатия. Хотя у подобных установок есть и минусы, например они довольно дорогие, а так же на подобных установках не имеется возможностей для изучения влияния скоростного режима и характеристик газообмена на процесс сгорания. Так же к минусам можно отнести то, что они не могут оценивать влияние различных факторов на токсичность отработавших газов при условиях, которые приближены к реальной работе автомобильного двигателя. Учитывая данные минусы при исследовании характеристик процесса сгорания, а так же влияния их на токсичность отработавших газов, применяют универсальные одноцилиндровые моторные установки.

Одна из таких установок называется УИТ–85. Она довольно хорошо приближена к реальным условиям работы автомобильного двигателя, при этом сочетает в себе положительные качества однотипных ей установок. УИТ–85 состоит из одноцилиндрового четырехтактного карбюраторного двигателя со способностью изменять степень сжатия. Отношение хода поршня к диаметру цилиндра равно $1,35$ ($S/D = 1,35$). Электромотор

приводит во вращение коленчатый вал. Такой привод коленчатого вала имеет положительные стороны, в частности он не допускает возможность неравномерности вращения, а так же имеет схожие характеристики от цикла к циклу. Установка имеет два постоянных режима вращения коленчатого вала, это 600 мин^{-1} и 900 мин^{-1} . В простом одножиклёрном карбюраторе готовится топливо–воздушная смесь, а так же его конструктивные особенности, в частности подогреваемый впуск, дает возможность готовить гомогенную топливо–воздушную смесь. При этом температура и влажность заряда на пуске постоянная. Конструктивные особенности данной одноцилиндровой установки дают возможность с большей вероятностью уменьшить цикловую неоднородность состава смеси и как следствие минимизировать межцикловую нестабильность работы двигателя, эта особенность крайне важна при изучении процесса горения. Помимо этого, данная установка имеет достаточно места в камере сгорания для монтирования датчика детонации. Это дает возможность заменить данный датчик детонации без кардинальных изменений в конструкции установки. Все вышесказанное говорит о том, что с помощью данной установки можно с достаточной точностью контролировать параметры, определяющие режимы работы двигателя, такие как: температура охлаждающей жидкости, обороты двигателя, состав смеси, степень сжатия, угол опережения зажигания и т.д., а так же есть возможность менять их без влияния на другие параметры. Все это говорит о том, что УИТ–85 дает возможность определять влияние на характеристики распространения пламени и токсичность отработавших газов непосредственно от того или иного фактора с довольно большой точностью. Это значит, что данная установка хорошо подходит для исследования процессов горения. В представленной работе, УИТ–85 применялась как модель реального автомобильного двигателя. Датчик детонации были заменен на ионизационный датчик оригинальной конструкции.

Конструктивные особенности как можно больше минимизируют

цикловую неоднородность состава смеси, это имеет большое значение при изучении процессов горения.

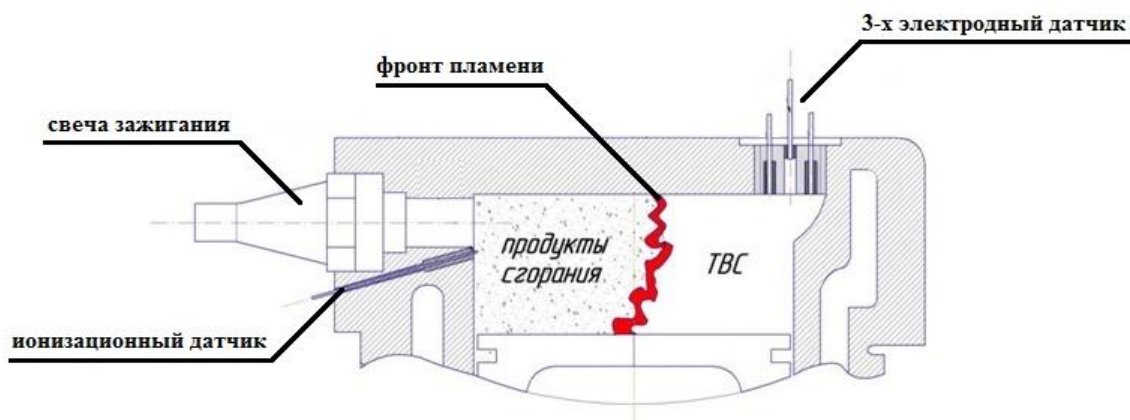


Рисунок 2.1 – Схема камеры сгорания УИТ-85

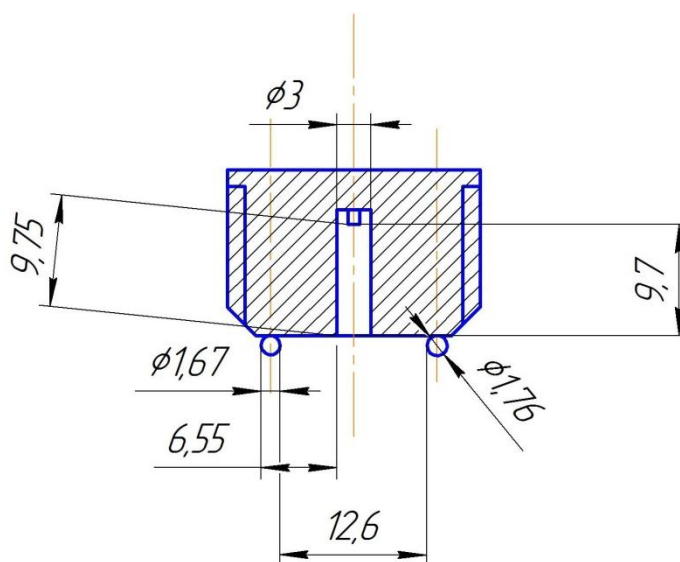


Рисунок 2.2 – Чертеж ионного датчика

В камере сгорания УИТ–85, которая представлена на рисунке 2.1 установлен трех-зондовый датчик ионизации, можно наблюдать на рисунке 2.2, который снимает осциллограмму ионного тока.

Так же у рядом со свечой зажигания был установлен датчик давления фирмы Kistler. Он предназначен для регистрации изменения индикаторного давления от времени.

Для определения различных характеристик распространения пламени

применялся трех–электродный ионизационный датчик, который представлен на рисунке 2.3. В едином корпусе расположены три изолированных электрода, которые изолированы от корпуса. Два электрода предназначенных для определения распространения пламени местной турбулентной скорости, которые можно увидеть на рисунке 2.3, распределены на торце, с диаметрами электродов 1,72 и 1.69 мм. Электрод расположенный в центре имеет вид усеченного конуса, с диаметрами 1,5 мм у основания и 1,0 мм у вершины. Он расположен в полости, открытой в камеру сгорания, высотой 9,3 мм и диаметром 3 мм. Данный электрод имеет выступ в полость колодца на 1,3 мм.

Доля экспериментов была выполнена с использованием авиационной свечи зажигания, в качестве ионизационного датчика, который представлен на рисунке 2.3.

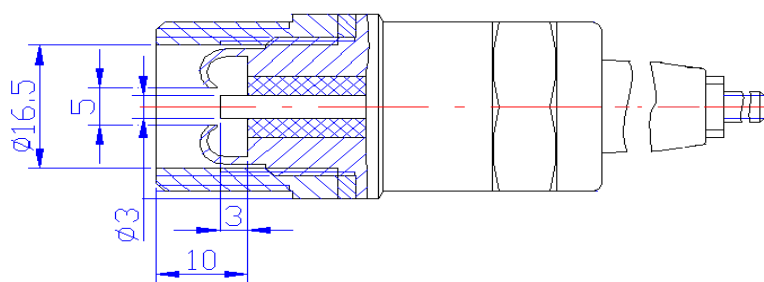


Рисунок 2.3 – Ионизационный датчик с открытой полостью в камеру сгорания

В датчике, который показан на рисунке 2.3, электрод, который расположен в середине имеет отрицательный потенциал, а сам корпус ионизационного датчика соответственно имеет положительный потенциал.

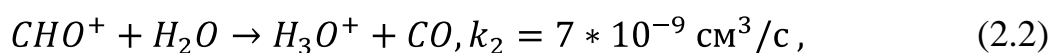
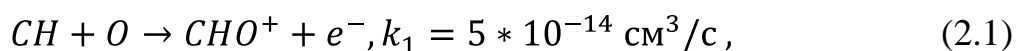
Как было сказано ранее, особенности УИТ-85 дают возможности с наибольшей точностью контролировать рабочие параметры самой, а так же изменять их без влияния на другие параметры. Что говорит о том, что используя данную установку мы имеем полное право оценивать влияние параметров на процесс горения и токсичность отработавших газов.

Что бы воздействовать на рабочий процесс горения и изменение различных характеристик горения для эксперимента использовали добавку водорода в топливо–воздушной смеси.

Изменяемыми факторами имелись состав смеси, угол опережения зажигания, частота вращения коленчатого вала и добавка водорода в топливо–воздушной смеси в количестве около 3% и 5%.

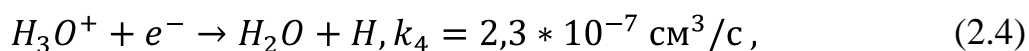
Попадая по очереди фронтом пламени на электроды датчика и торец корпуса датчика, замыкает цепь соответствующего изолированного электрода, из-за чего в цепи возникает ток, который можно обосновать электропроводностью пламени, то есть хемионизация.

Основываясь на результатах фундаментальных исследований определена хемионизация в области горения углеводородного топлива, исследования по это работе представлены в работах [34, 35, 30, 12, 5]. Исходя из результатов данных исследований было обнаружено, что в зоне горения присутствуют следующие ионы: CH_3^+ , CHO^+ , C_3H_3^+ и H_3O^+ . Концентрация иона CH_3^+ составляет меньше одной тысячной концентрации ионов CHO^+ и C_3H_3^+ . Ион H_3O^+ при протекании химических реакций горения образуется позже остальных. Из выше сказанного авторы представленных работ делают вывод, что первичными ионами, которые определяют образование других ионов являются ионы: CHO^+ и C_3H_3^+ . Следующими реакциями можно определить ионизацию в зоне:



Ион H_3O^+ будет является доминирующим в данной группе. Скорость реакции значительно выше, причем почти все ионы CHO^+ трансформируются в H_3O^+ , тогда взаимодействие данного иона с электроном получится

молекула воды и атом водорода:



Выше упомянутая реакция проходит довольно быстро, но столкновение этих двух частиц значительно маленькое. Скорости данных реакций представлены в работе [30].

2.2 Методика проведения эксперимента

Принципом данного эксперимента является в одновременном снятии сигналов с цепи трех–зондового ионизационного датчика и датчика положения коленчатого вала и преобразование снятых сигналов в осциллограммы. Данные сигналы преобразуются используя многоканальный аналого–цифровой преобразователь L–Card, который записывает сигналы в виде данных в память электронной вычислительной машины. Схема такой системы представлена на рисунке 2.3.

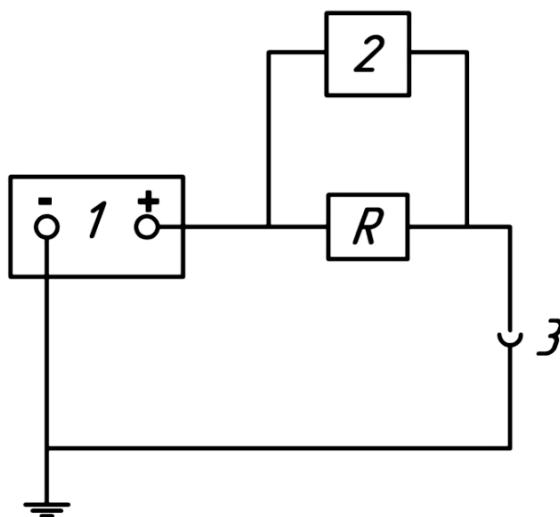


Рисунок 2.4 – Схема регистрационной системы:

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

Изменяемыми факторами являются: состав топливо–воздушной смеси, а так же доля добавки водорода в топливо–воздушной смесь. Установка УИТ–85 работала при следующих параметрах: степень сжатия 5,9 и 7, угол

опережения зажигания 15° , вращение коленчатого вала 600 и 900 мин^{-1} . При изменении кого–либо параметра, изменялся и сам вид осредненного импульса. Пример такого осредненной осциллограммы представлен на рисунке 2.5.

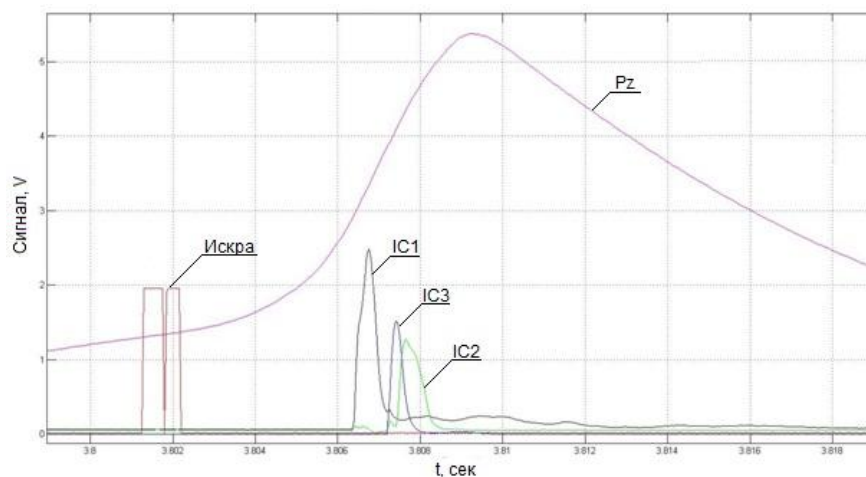


Рисунок 2.5 – Пример осциллограммы исследуемых сигналов

P_z – Пик по давлению в цилиндре двигателя; IC1 – Сигнал ионного тока с первого зонда; IC2 – Сигнал ионного тока со второго зонда; IC3 – Сигнал ионного тока с третьего зонда;

Обработка полученных осциллограмм сводилась в определение усреднённых параметров оценки сигнала по всей группе циклов. Средние значения по циклам осуществляются, чтобы снизить ошибки, которые связаны с между цикловой нестабильностью процесса горения в поршневом двигателе внутреннего сгорания. Ко всему этому для каждого режима оценивалось распределение значений ионного тока и времени его появления. Гистограмма по распределению параметров оценки ионного тока, которые получены при осреднении зарегистрированных последовательных циклов сгорания, довольно наглядно объясняется кривой нормального распределения.

Результаты проведённых экспериментов представляются в виде осциллограмм ионного тока, пример которой показан на рисунке 2.4 [47].

Методика эксперимента заключалась в регистрации осциллограмм ионного тока на каждом режиме в количестве от 100 до 400 циклов горения подряд. Обработка полученных осциллограмм сводилась в определение усреднённых параметров оценки сигнала по всей группе циклов. Средние значения по циклам осуществляются, чтобы снизить ошибки, которые связаны с междуцикловой нестабильностью процесса горения в поршневом двигателе внутреннего сгорания. Ко всему этому для каждого режима оценивалось распределение значений ионного тока и времени его появления. Гистограмма по распределению параметров оценки ионного тока, которые получены при осреднении зарегистрированных последовательных циклов сгорания, довольно наглядно объясняется кривой нормального распределения.

2.3 Методика обработки результатов полученных измерений.

По полученному параметру – промежуток времени от подачи искрового разряда до возникновения импульса напряжения ионного тока, можно определить среднее значение скорости распространения пламени по следующей формуле:

$$U_{\text{cp}} = \frac{L}{t}, \quad (2.5)$$

где U_{cp} – среднее значение скорости распространения пламени, t – промежуток времени, L – расстояние от свечи зажигания до ИЗ,

Турбулентная скорость распространения пламени на участке между первым и вторым электродами определяется по формуле:

$$U_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{(t_2 - t_1)}, \quad (2.6)$$

Где L_{1-2} – расстояние между первым и вторым электродами, $(t_2 - t_1)$ – промежуток времени между первым и вторым электродами в момент возникновения пламени.

В данном подходе электроды ионизационного датчика регистрируют

проходящий фронт турбулентного пламени с турбулентной скоростью U_{1-2} .

По следующей формуле можно определить скорость распространения пламени в полости трех–электродного ионизационного датчика:

$$U_k = \frac{h_k}{t_3 - t_1 - \frac{L_{k-1}}{U_{1-2}}}, \quad (2.7)$$

Где h_k – высота полости датчика, L_{k-1} – расстояние между первым электродом ионного датчика и осью полости датчика, $t_3 - t_1$ – время, когда появляется ионный ток на первом и третьем электроде, $\frac{L_{k-1}}{U_{1-2}}$ – временной промежуток, за который передняя граница зоны турбулентного горения перемещается от первого электрода до оси полости датчика.

С целью исследования влияния на характеристики пламени и параметры рабочего процесса к основному топливу добавлялся водород, массовая доля которого определялась по формуле:

$$r_{H_2} = \frac{G_{H_2}}{G_{H_2} + G_B}, \quad (2.8)$$

Где G_{H_2} – массовая доля водорода в топливо–воздушной смеси, G_B – массовая доля бензина в топливо–воздушной смеси.

Коэффициент избытка воздуха для бензинового двигателя можно выразить уравнением:

$$\alpha = \frac{G_B}{G_T * L_0}, \quad (2.9)$$

Где G_B – часовой расход воздуха, кг/ч; G_T – часовой расход топлива, кг/ч; L_0 – теоретическое необходимое значение значения воздуха для полного сгорания 1 кг топлива, кг/кг. Для бензина значение L_0 будет равно примерно 14,9 кг/кг.

Глава 3 Обработка результатов испытаний.

3.1 Результаты испытаний по ионному току второго зонда датчика.

По результатам эксперимента были получены сигналы ионного тока со второго зонда ионизационного датчика. Сигнал этого зонда показывает скорость распространения пламени в полости датчика. По результатам, полученным с этого датчика можно построить графики показывающие характер ионного тока в полости датчика, которые представлены на рисунках 3.1 и 3.2, для двух режимов частоты вращения коленчатого вала 600 и 900 мин⁻¹ и разных добавок водорода.

Полученная разница между сигналом цепи ионизационного датчика без добавки водорода и с добавкой водорода 3% и 5% характеризуется тем, что водород из-за своих физико-химических свойств увеличивает нормальную скорость распространения пламени, а значит и приводит к увеличению турбулентной скорости, что определяет догорание топливо-воздушной смеси при меньшем объеме камеры сгорания, то есть при более высокой температуре и давлении. Так же можно отметить, что различия в сигналах цепи ионизационного датчика с добавкой водорода 3% и 5% минимальны. Это указывает на то, что дальнейшая добавка активатора горения, в данном случае водорода перестает влиять на физико-химические процессы горения и не приводит к дальнейшему увеличению интенсивности данных реакций.

Еще можно отметить большую продолжительность реакции с добавкой водорода относительно коэффициента избытка воздуха. Как известно из теории горения, температура и давление в камере сгорания уменьшается и горение топливо-воздушной смеси происходит медленнее и, в конце концов, прекращается.

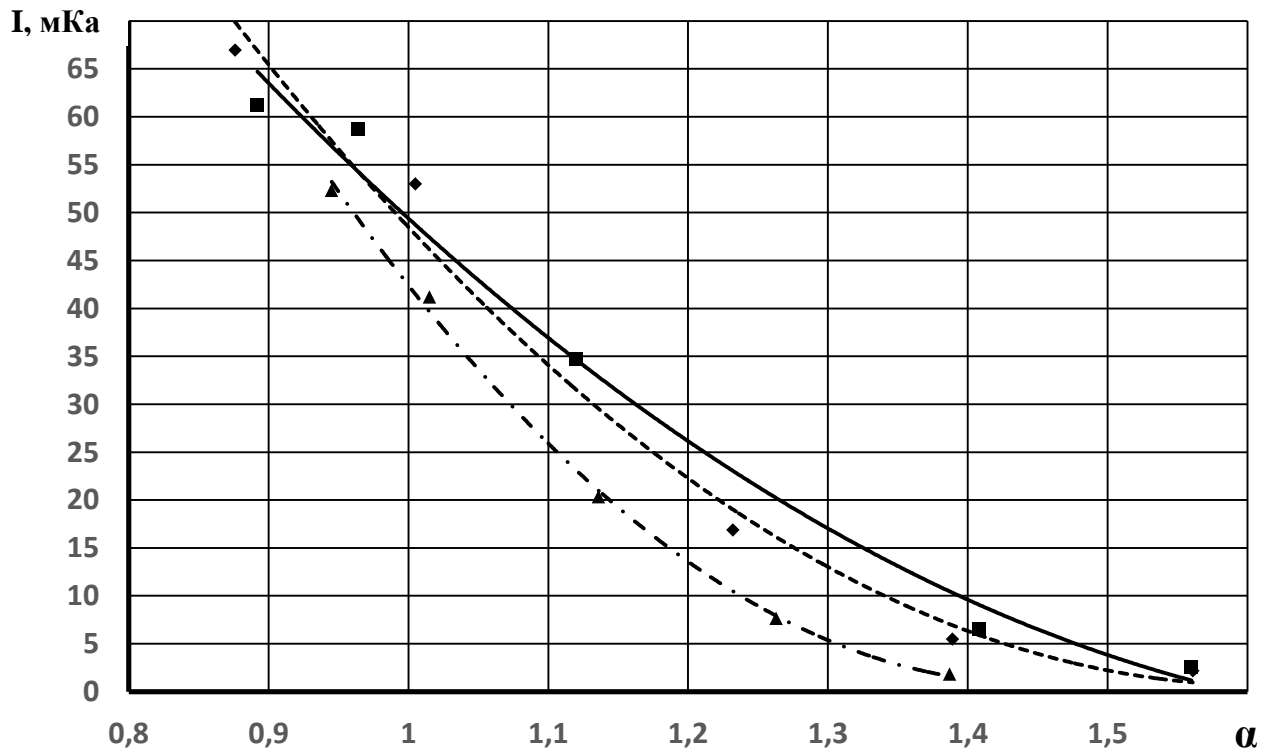


Рисунок 3.1 – Сравнение графиков зависимости ионного тока второго зонда от коэффициента избытка воздуха при режиме вращения коленчатого вала 600 мин^{-1} .

— · — — $IC_2 = f \alpha$, без добавки водорода.

- - - $IC_2 = f \alpha$, с добавкой водорода 3%.

— — $IC_2 = f \alpha$, с добавкой водорода 5%.

Когда с добавкой водорода процесс горения имеет место на более бедных смесях за счет увеличения интенсивности процесса горения, то есть увеличение нормальной скорости пламени и, следовательно, турбулентной скорости распространения пламени, что приводит к нормальному сгоранию на бедных смесях схожих при сгорании без добавки водорода топливо–воздушной смеси на коэффициенте избытка воздуха равному 1.

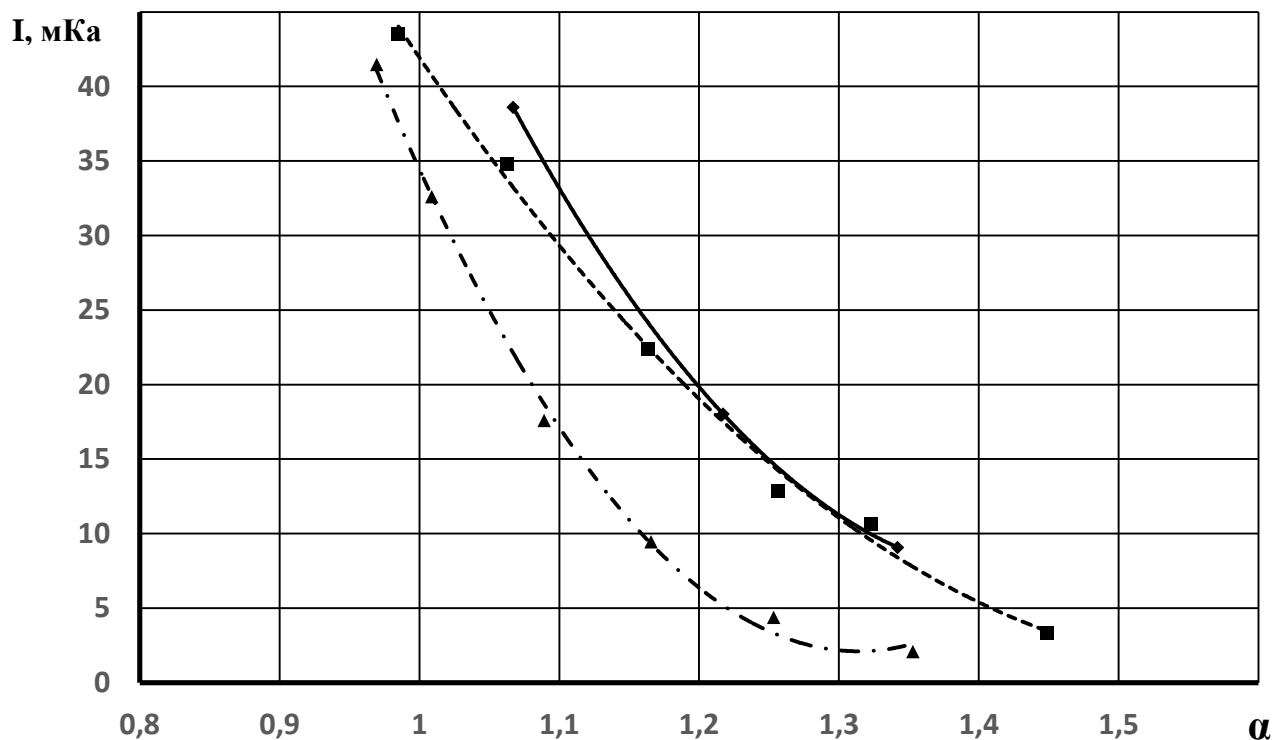


Рисунок 3.2 – Сравнение графиков зависимости ионного тока второго зонда от коэффициента избытка воздуха при режиме вращения коленчатого вала 900 мин^{-1} .

- – $IC_2 = f \alpha$, без добавки водорода.
- – $IC_2 = f \alpha$, с добавкой водорода 3%.
- – $IC_2 = f \alpha$, с добавкой водорода 5%.

Так же возрастание ионного тока с 5% добавкой водорода относительно ионного тока без добавки водорода увеличивается почти равномерно на всем протяжении изменения коэффициента избытка воздуха, это особенно заметно при скоростном режиме 900 мин^{-1} , который можно увидеть на рисунке 3.2.

Увеличение сигнала с цепи ионизационного датчика на режиме 600 мин^{-1} , который можно наблюдать на рисунке 3.1 имеет прирост с добавкой водорода 3% и 5% примерно на 50%. На скоростном режиме 900 мин^{-1} , сигнала с цепи ионизационного датчика имеет прирост, в среднем, в 2 раза.

3.2 Результаты испытаний по ионному току третьего зонда датчика.

По результатам эксперимента были получены значения сигналов с цепи ионизационного датчика третьего зонда. Сигнал с цепи ионизационного датчика третьего зонда имеет зависимость с местной турбулентной скорости распространения пламени. По результатам, полученным с цепи ионизационного датчика третьего зонда можно построить графики зависимости ионного тока третьего зонда от коэффициента избытка воздуха. Графики для двух скоростных режимах представлены на рисунках 3.3 и 3.4.

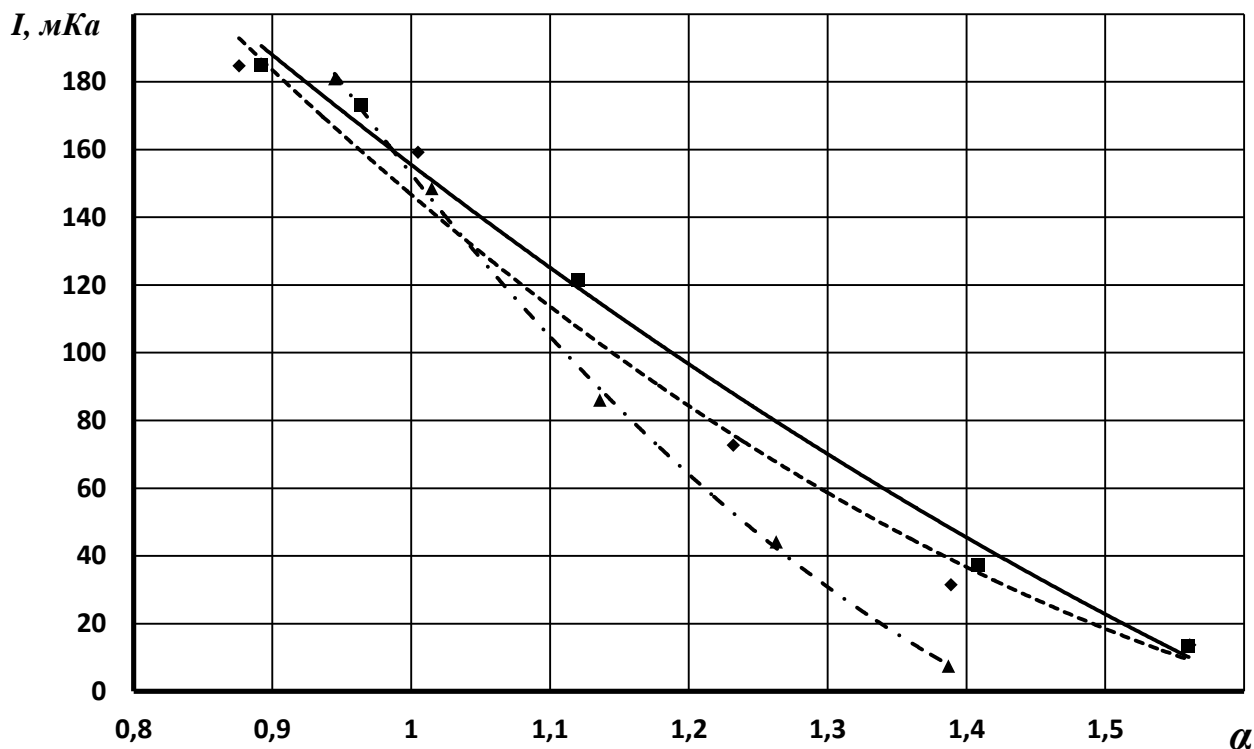


Рисунок 3.4 – Сравнение графиков зависимости ионного тока третьего зонда от коэффициента избытка воздуха при режиме вращения коленчатого вала 600 мин^{-1} .

..... $I_{C_3} = f \alpha$, без добавки водорода.

----- $I_{C_3} = f \alpha$, с добавкой водорода 3%.

— $I_{C_3} = f \alpha$, с добавкой водорода 5%.

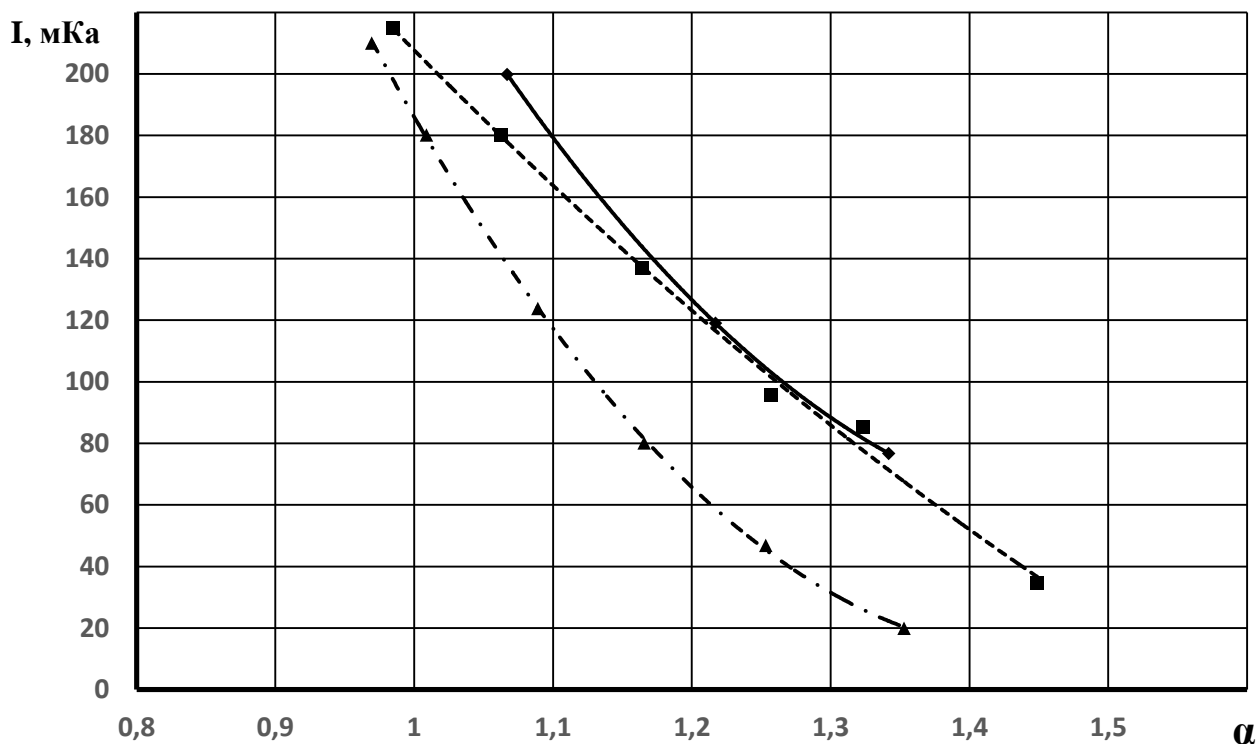


Рисунок 3.5 – Сравнение графиков зависимости ионного тока третьего зонда от коэффициента избытка воздуха при режиме вращения коленчатого вала 900 мин^{-1} .

----- $I_{C_3} = f \alpha$, без добавки водорода.

- - - - $I_{C_3} = f \alpha$, с добавкой водорода 3%.

— — $I_{C_3} = f \alpha$, с добавкой водорода 5%.

По полученным графикам можно определить то, что при добавках водорода значения ионного тока так же имеют увеличение, что говорит о увеличении интенсивности местной турбулентной скорости.

При скоростном режиме 600 мин^{-1} можно наблюдать то, что значение ионного тока примерно равны при коэффициенте избытка воздуха 1, но с обеднением топливо–воздушной смеси значение ионного тока возрастает. Это как раз объясняется увеличением интенсивности местной турбулентной скорости распространения пламени за счет добавки водорода и влияния ее на физико–химические процессы сгорания. На скоростном режиме 600 мин^{-1} значения тока цепи ионизационного к более бедным смесям имеет прирост примерно на 50%.

При скоростном режиме 900 мин^{-1} видно совпадение значений ионного тока при добавка водорода 3% и 5%. За счет большей скорости вращения вала, реакция протекает позднее при тех же значениях угла опережения зажигания и α , в этом случае добавка водорода имеет примерно одинаковое влияние на физико–химические процессы горения. На скоростном режиме 900 мин^{-1} значения тока цепи ионизационного имеет прирост к более бедным смесям в 2 раза.

3.3 Результаты испытаний по скоростям и ионному току при разных степенях сжатия.

На графике, который предоставлен на рисунке 3.12, показана зависимость ионного тока в полости зонда ионного датчика, который можно увидеть на рисунке 2.3, от коэффициента избытка воздуха при угле опережения зажигания 15 градусов до верхней мертвой точки и двух степенях сжатия 5,9 и 7 [54].

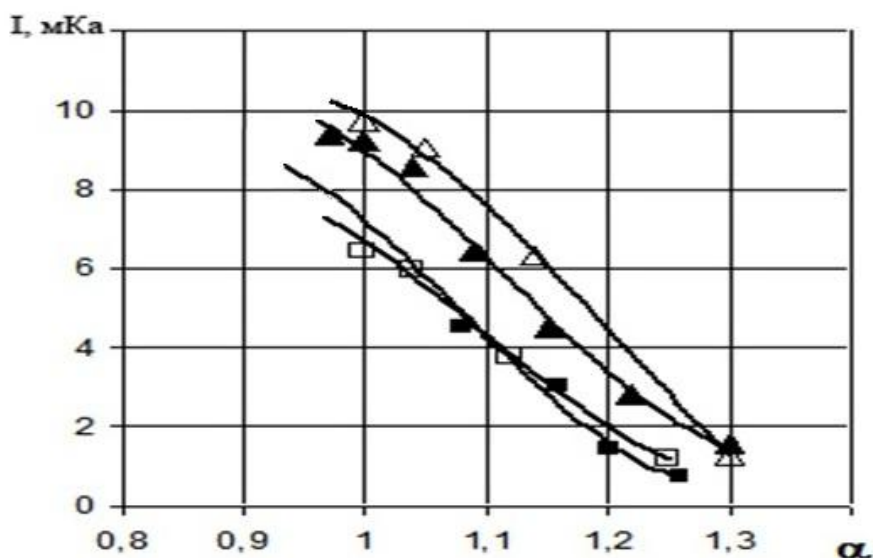


Рисунок 3.6 – График зависимости ионного тока в полости ионного датчика от коэффициента избытка воздуха при степенях сжатия 7 и 5,9.

□ – $n = 600 \text{ мин}^{-1}, \epsilon = 5,9$; ■ – $n = 900 \text{ мин}^{-1}, \epsilon = 5,9$; △ – $n = 600 \text{ мин}^{-1}, \epsilon = 7$; ▲ – $n = 900 \text{ мин}^{-1}, \epsilon = 7$.

Можно отметить то, что величины ионного тока на двух режимах частоты вращения вала совпадают. Тогда можно предположить, что увеличение турбулентности в камере сгорания не имеет влияния на протекание процесса сгорания в полости ионного датчика в представленной конструкции. Можно предположить, что в полости ионного датчика непосредственно в зоне расположения его отрицательного электрода, пламя будет, распространяется по ламинарному механизму.

С увеличением степени сжатия с 5,9 до 7 ионный ток возрастает, при этом примерно равномерно во всем диапазоне значений коэффициента избытка. Причиной того, что ионный ток возрастает является то, что увеличивается начальная температура топливо–воздушной смеси путем увеличения степени сжатия.

Интенсивность химических реакций горения во фронте пламени определяет ионный ток в пламени углеводородной смеси, что дает возможность оценить нормальную скорость пламени [57].

Таким образом, можно сказать то, что изменения в ионном токе говорят нам об изменениях нормальной скорости распространения пламени. Основываясь на данные результаты можно сказать, что интенсивность протекания химических реакций в полости ионизационного датчика зависит от степени сжатия и состава смеси и не зависит от изменения турбулентности, то есть от оборотов коленчатого вала.

Результаты исследования скоростей распространения пламени при разных степенях сжатия и добавке водорода. Результаты представлены в виде графиков, которые можно наблюдать на рисунках 3.7 и 3.8.

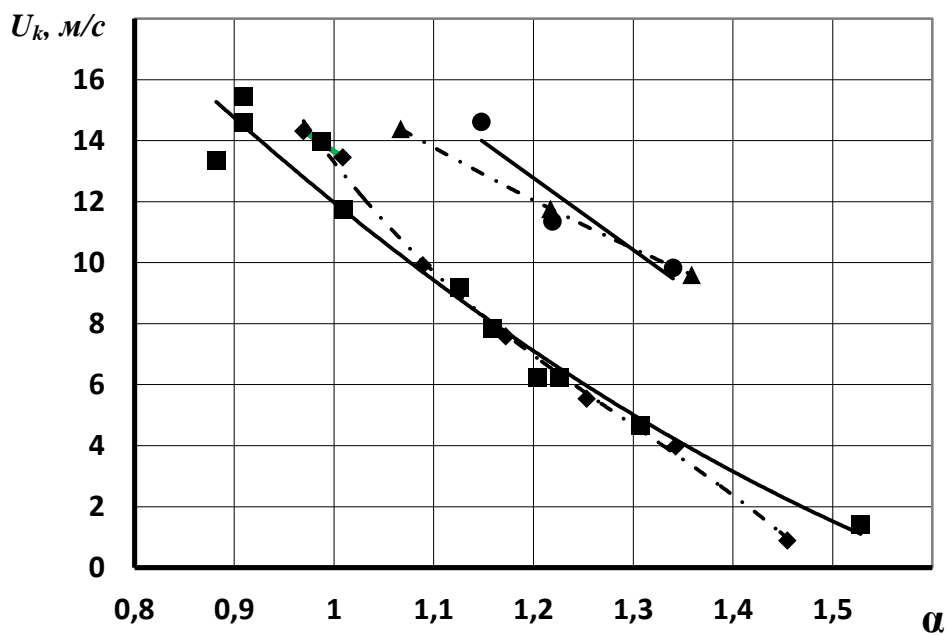


Рисунок 3.7 – График зависимости скорости в полости ионного датчика в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

■ – Скорость в полости датчика при $\epsilon = 5,9$ и $H_2 = 0\%$; ● – Скорость в полости датчика при $\epsilon = 5,9$ и $H_2 = 5\%$; ◆ – Скорость в полости датчика при $\epsilon = 7$ и $H_2 = 0\%$; ▲ – Скорость в полости датчика при $\epsilon = 7$ и $H_2 = 5\%$;

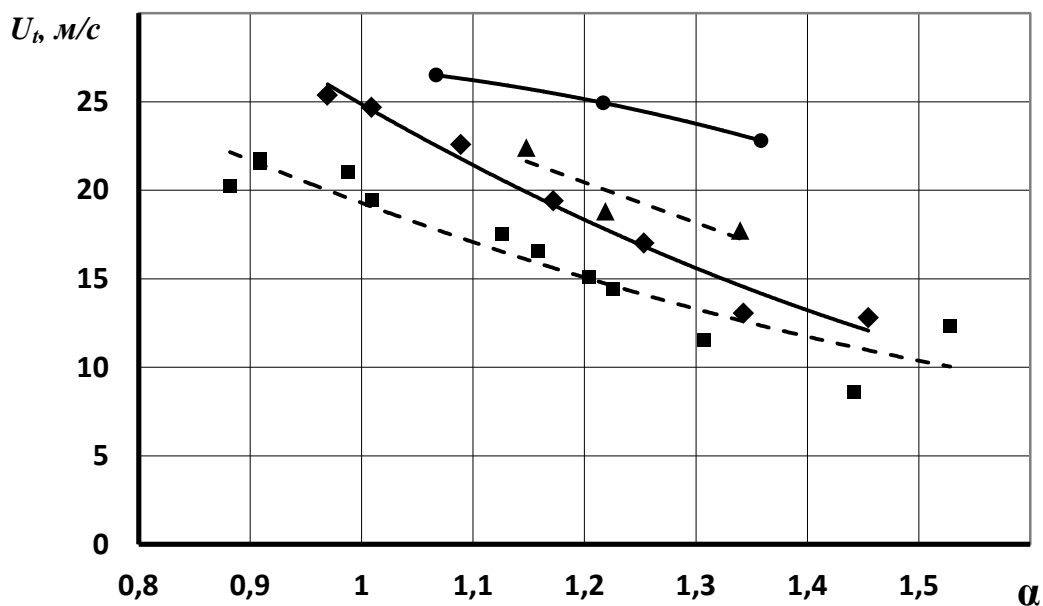


Рисунок 3.8 – График зависимости турбулентной скорости в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

■ – Скорость в полости датчика при $\epsilon = 5,9$ и $H_2 = 0\%$; ● – Скорость в полости датчика при $\epsilon = 5,9$ и $H_2 = 5\%$; ◆ – Скорость в полости датчика при $\epsilon = 7$ и $H_2 = 0\%$; ▲ – Скорость в полости датчика при $\epsilon = 7$ и $H_2 = 5\%$;

Исходя из данных графиков можно говорить о том, что скорости в полости датчика без добавки водорода не имеют зависимости от степени сжатия, что говорит нам о сложном процессе распространения пламени. Скорее всего, распространение пламени у подхода к полости датчика протекает по турбулентному механизму, а в самой полости пламя уже распространяется по ламинарному механизму, то есть по нормальной скорости распространения пламени. Так же можно отметить, что при большей степени сжатия идет увеличение турбулентной скорости из-за роста интенсивности турбулентности при уменьшении высоты камеры сгорания.

Все это говорит о том, что при добавке водорода происходит рост скоростей распространения пламени, как турбулентной, так и в полости ионного датчика. Поэтому можно говорить о том, что с помощью разницы между турбулентной скоростью и скоростью в полости датчика можно определять интенсивность турбулентности в камере сгорания двигателя. С увеличением степени сжатия с 5,9 до 7,0 интенсивность турбулентности возросла примерно на 35%.

Глава 4 Анализ результатов испытаний.

а. Анализ результатов ионного тока второго зонда ионного датчика.

Анализ графиков сигнала с цепи второго зонда ионизационного датчика говорит о том, что амплитуда сигнала в цепи ионизационного датчика, а первую очередь имеет зависимость от состава топливо–воздушной смеси.

Сначала рассмотрим разницу сигналов с цепи второго зонда ионизационного датчика при различных режимах частоты вращения коленчатого вала и по полученным значениям построим график, который можно наблюдать на рисунке 4.1.

Как можно видеть из графика на рисунке 4.1 значения ионного тока различаются на разных скоростных режимах. Данная разница объясняется уменьшением времени протекания процесса сгорания за счет увеличения скоростного режима. Протекине процесса происходит при большем объеме камеры сгорания, а значит при меньшей температуре в камере сгорания. Это говорит о том, что сгорание проходит хуже, что как раз и можно наблюдать на данном графике.

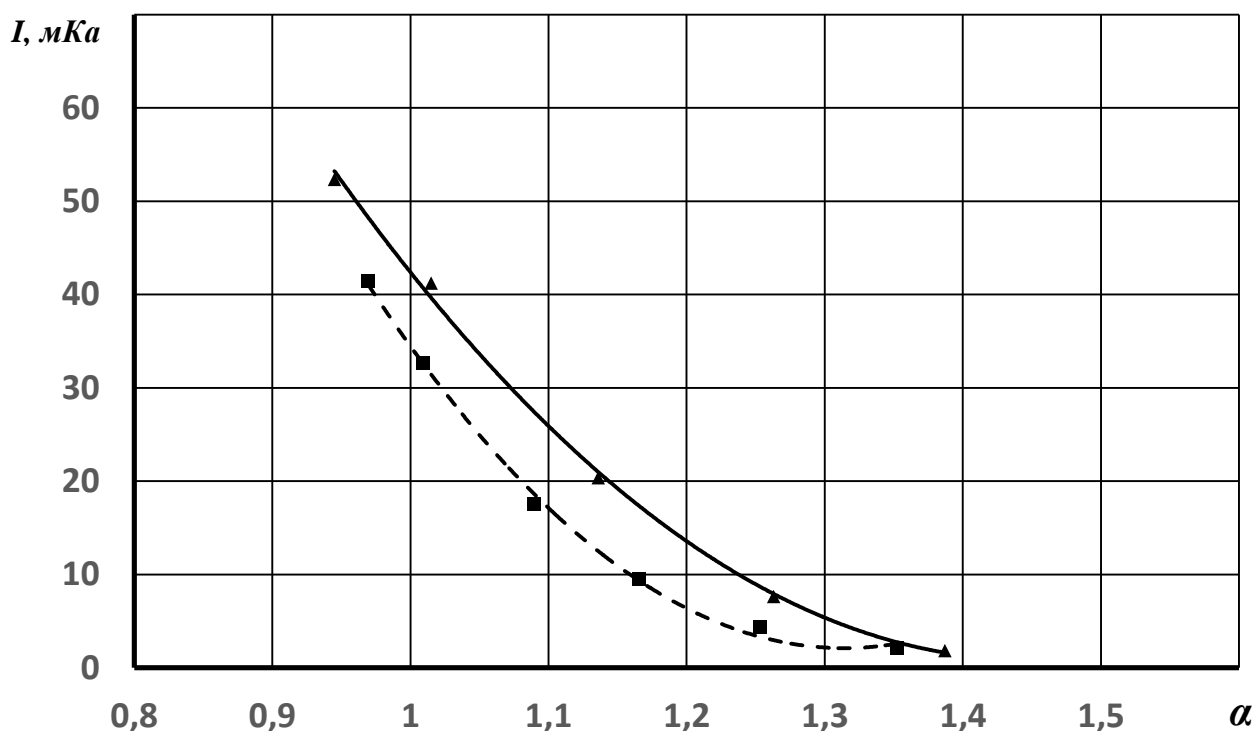


Рисунок 4.1 – Сравнение сигналов с цепи второго зонда ионизационного датчика при двух режимах вращения коленчатого вала 600 и 900 мин⁻¹ без добавки водорода.

--- $IC_2 = f \alpha$, при скоростном режиме 900 мин⁻¹.

— $IC_2 = f \alpha$, при скоростном режиме 600 мин⁻¹.

Далее рассмотрим сигнал с цепи второго зонда ионизационного датчика при добавке водорода 3%. Построим график зависимости значений полученного сигнала от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.2.

Из графика на рисунке 4.2 можно видеть, что при добавке водорода 3%, так же имеет место влияния скоростного режима на процесс горения. Хотя водород и служит активатором горения и как видно увеличивает значение ионного тока, но при это все равно остается влияние скоростного режима. Так же можно наблюдать, что значения ионного тока наблюдаются при более бедных смесях за счет добавки водорода.

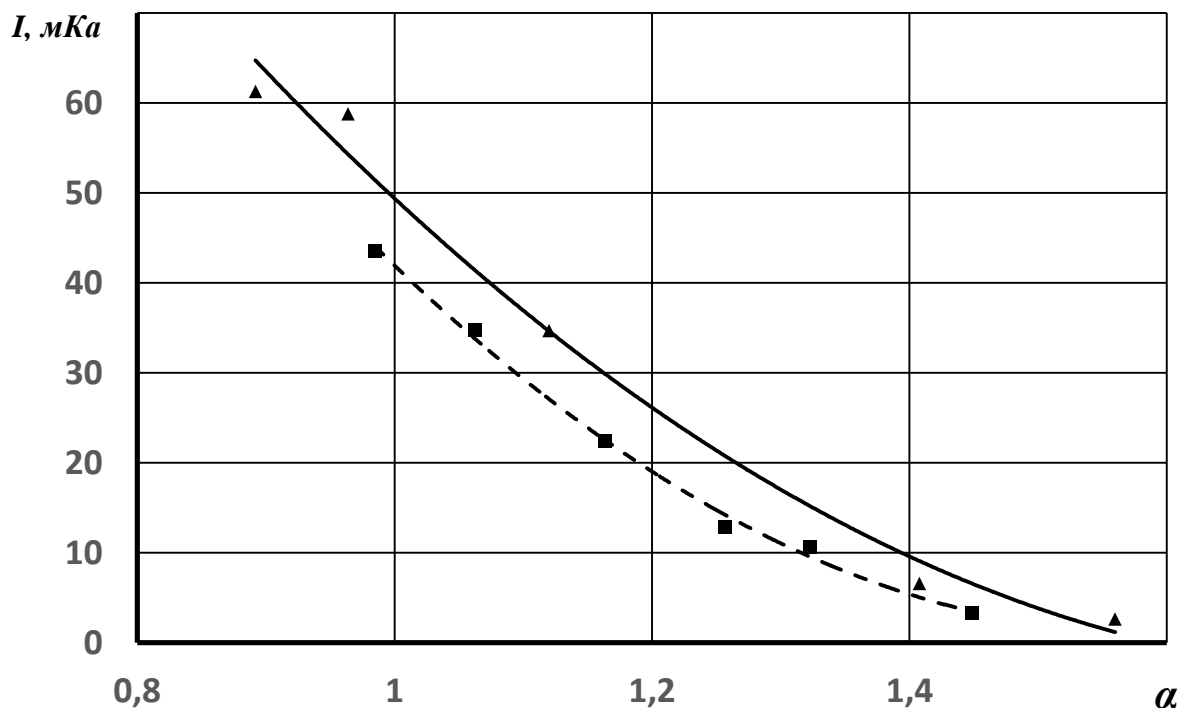


Рисунок 4.2 – Сравнение сигналов с цепи второго зонда ионизационного датчика при двух режимах вращения коленчатого вала 600 и 900 мин⁻¹ с добавкой водорода 3%.

--- $IC_2 = f \alpha$, при скоростном режиме 900 мин⁻¹.

— $IC_2 = f \alpha$, при скоростном режиме 600 мин⁻¹.

Теперь рассмотрим сигналы с цепи второго зонда ионизационного датчика при добавке водорода 5%. График зависимости значений ионного тока от коэффициента избытка воздуха можно наблюдать на рисунке 4.3.

Как видно из графика на рисунке 4.3, при добавке водорода 5% влияние скоростного режима перестает быть и сигналы с цепи второго зонда ионизационного датчика примерно равны. Как говорилось ранее, в полости

ионизационного датчика процесс горения происходит по ламинарному механизму, а у краев полости датчика имеет место турбулентное распространение пламени. Скорее всего, при добавке водорода 5%, процесс горения в полости ионизационного датчика начинает принимать турбулентный характер.

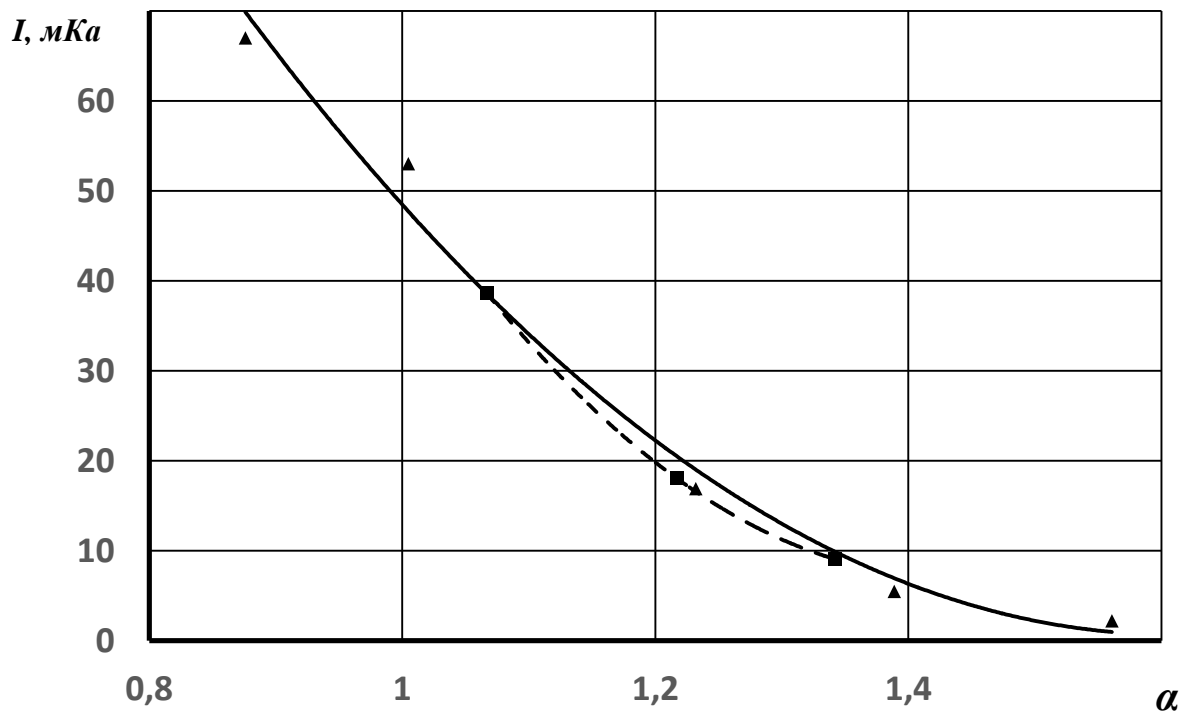


Рисунок 4.3 – Сравнение сигналов с цепи второго зонда ионизационного датчика при двух режимах вращения коленчатого вала 600 и 900 мин⁻¹ с добавкой водорода 5%.

--- $IC_2 = f \alpha$, при скоростном режиме 900 мин⁻¹.

— $IC_2 = f \alpha$, при скоростном режиме 600 мин⁻¹.

Для того чтобы увидеть общую картину влияния скоростного режима и добавки водорода в топливо–воздушную смесь построим обобщенный график, который представлен на рисунке 4.4.

Из полученного графика можно увидеть, что при добавке водорода имеются сигналы с цепи второго зонда ионизационного датчика на более бедных смесях, что объясняется свойствами активатора горения, в данном

случае водорода. В момент, когда сгорание завершается водород за счет своих физико-химических свойств увеличивает нормальную скорость распространения пламени и как следствие увеличивается турбулентная скорость. В углеводородной смеси содержатся молекулы водорода. Они играют немаловажную роль в процессе горения, в качестве активных центров. То есть присутствие водорода в топливо-воздушной смеси дает нужные условия для образования новых, дополнительных активных центров. Это положительно сказывается на процессе горения, снижается нужное число энергии для воспламенения, а так же расширяются пределы стабильного горения.

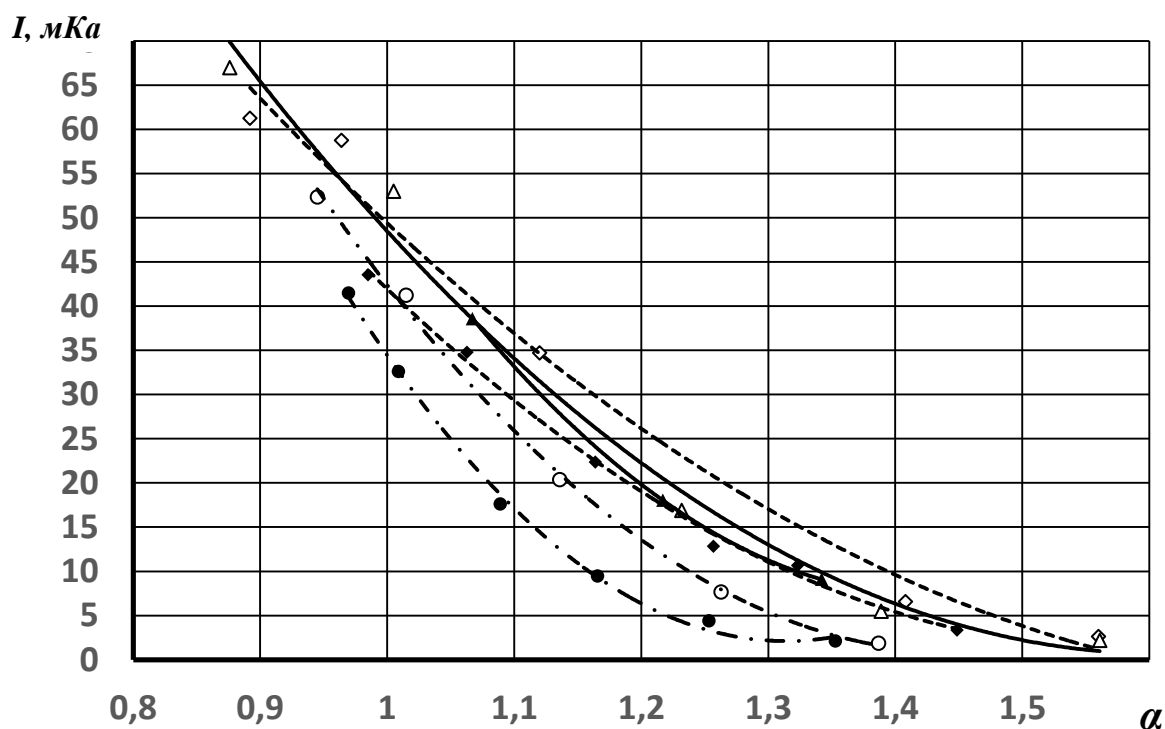


Рисунок 4.4 – Обобщенный график сигналов с цепи второго зонда ионизационного датчика при двух режимах вращения коленчатого вала 600 и 900 мин⁻¹.

● – Сигнал ионного тока второго зонда при $n=900 \text{ мин}^{-1}$ и $\text{H}_2=0\%$; ◆ – Сигнал ионного тока второго зонда при $n=900 \text{ мин}^{-1}$ и $\text{H}_2=3\%$; ▲ – Сигнал ионного тока второго зонда при $n=900 \text{ мин}^{-1}$ и $\text{H}_2=5\%$; ○ – Сигнал ионного тока второго зонда при $n=600 \text{ мин}^{-1}$ и $\text{H}_2=0\%$; ◇ – Сигнал ионного тока второго зонда при $n=600 \text{ мин}^{-1}$ и $\text{H}_2=3\%$; △ – Сигнал ионного тока второго зонда при $n=600 \text{ мин}^{-1}$ и $\text{H}_2=5\%$;

в. Анализ результатов ионного тока третьего зонда ионного датчика.

Рассмотрим разницу между сигналами цепи третьего зонда ионизационного датчика. Как говорилось ранее этот с помощью этого сигнала можно судить о характере местной турбулентной скорости. На основе полученных значений построим график зависимости сигналов цепи третьего зонда ионизационного датчика от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.5.

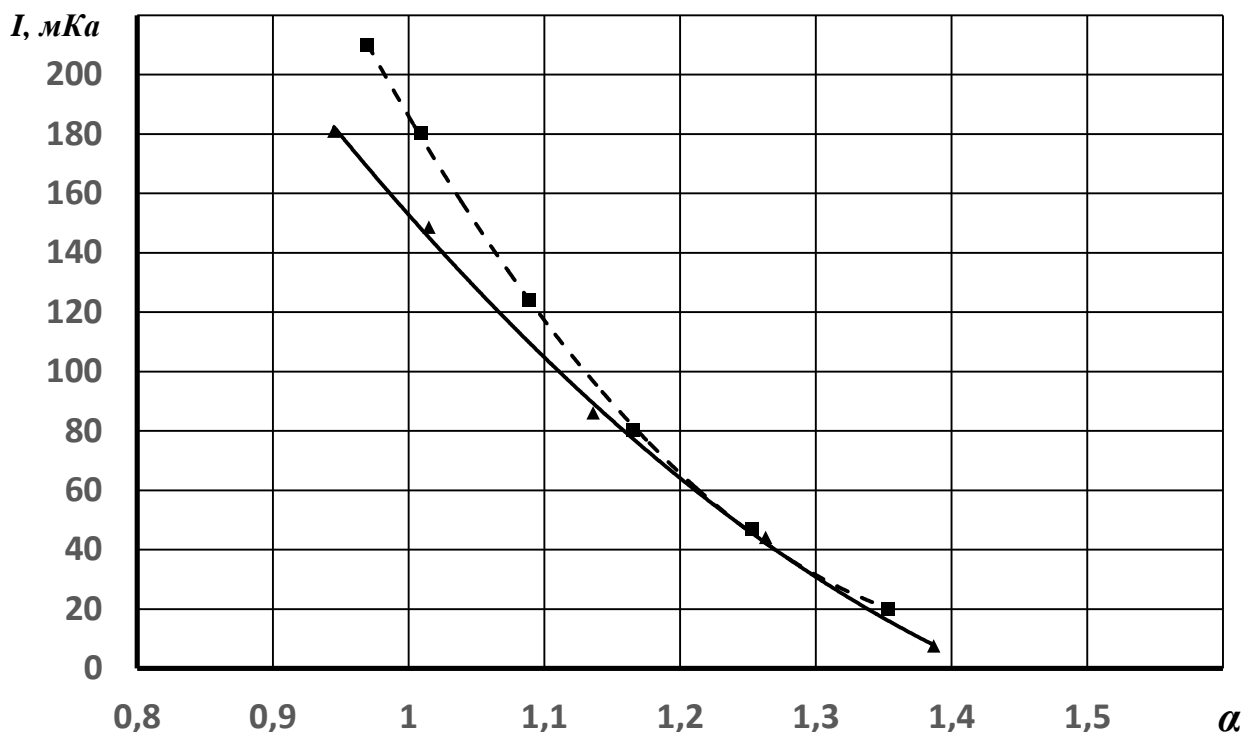


Рисунок 4.5 – Сравнение сигналов с цепи третьего зонда ионизационного датчика при двух режимах вращения коленчатого вала 600 и 900 мин⁻¹ без добавки водорода.

--- $IC_3 = f \alpha$, при скоростном режиме 900 мин⁻¹.

— $IC_3 = f \alpha$, при скоростном режиме 600 мин⁻¹.

Из полученного графика можно видеть, что влияние скоростного режима имеет влияние только при коэффициенте избытка воздуха 1, то есть при стехиометрическом составе. При стехиометрическом составе смеси

сгорание происходит лучше, как известно из теории горения. При скоростном режиме 900 мин^{-1} турбулентное распространение пламени протекает с большой интенсивностью, а при более бедных смесях процесс сгорания затухает и скорее всего сгорание начинает проходить по ламинарному механизму.

Далее рассмотрим сигналы с цепи третьего зонда ионизационного датчика при добавке водорода 3%. На основе полученных значений построим график зависимости значений сигналов с цепи третьего зонда ионизационного датчика от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.6.

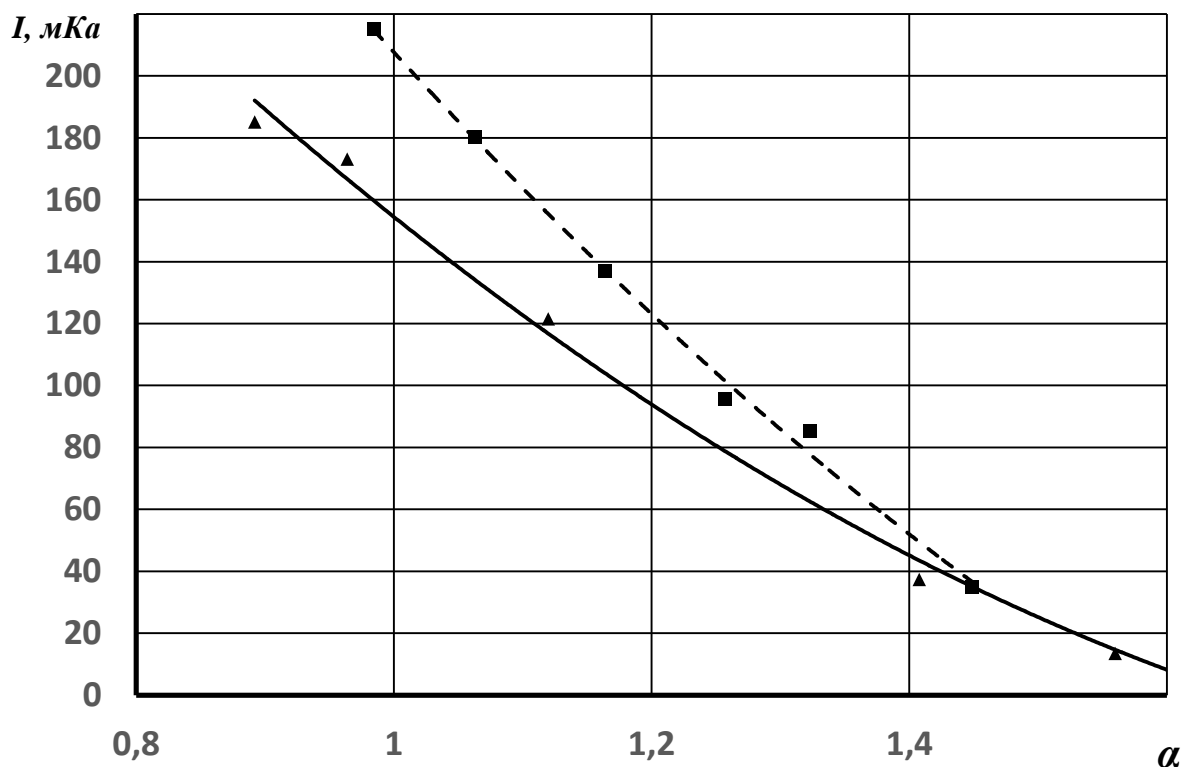


Рисунок 4.6 – Сравнение сигналов с цепи третьего зонда ионизационного датчика при двух режимах вращения коленчатого вала 600 и 900 мин^{-1} с добавкой водорода 3%.

--- $I_{C_3} = f \alpha$, при скоростном режиме 900 мин^{-1} .

— $I_{C_3} = f \alpha$, при скоростном режиме 600 мин^{-1} .

Из данного графика можно увидеть прирост ионного при скоростном режиме 900 мин^{-1} относительно скоростного режима 600 мин^{-1} . При большей частоте вращения коленчатого вала имеет место большая интенсивность турбулентного распространения пламени. К тому же, добавка водорода за счет своих физико–химических свойств дает прирост нормальной скорости распространения пламени и как следствие увеличение турбулентной скорости распространения пламени. Но как можно видеть из полученного графика, влияние водорода становится одинокого при более бедных смесях.

Значение ионного тока при увеличении частоты вращения коленчатого вала, увеличивается примерно от 10 до 40 мКа при различных коэффициентах избытка воздуха.

Рассмотрим разницу сигналов с третьего зонда цепи ионизационного датчика при добавке водорода 5%. Для этого построим график зависимостей сигналов третьего зонда цепи ионизационного датчика от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.7.

Из полученного графика видно, что добавка водорода 5% имеет большее влияние на интенсивность турбулентного распространения пламени, за счет своих физико–химических свойств. При скоростном режиме 900 мин^{-1} интенсивность турбулентного горения намного выше, чем на скоростном режиме 600 мин^{-1} , значения ионного тока имеет прирост примерно от 20 до 60 мКа, при чем прирост ионного наблюдается на при всем изменении коэффициента избытка воздуха.

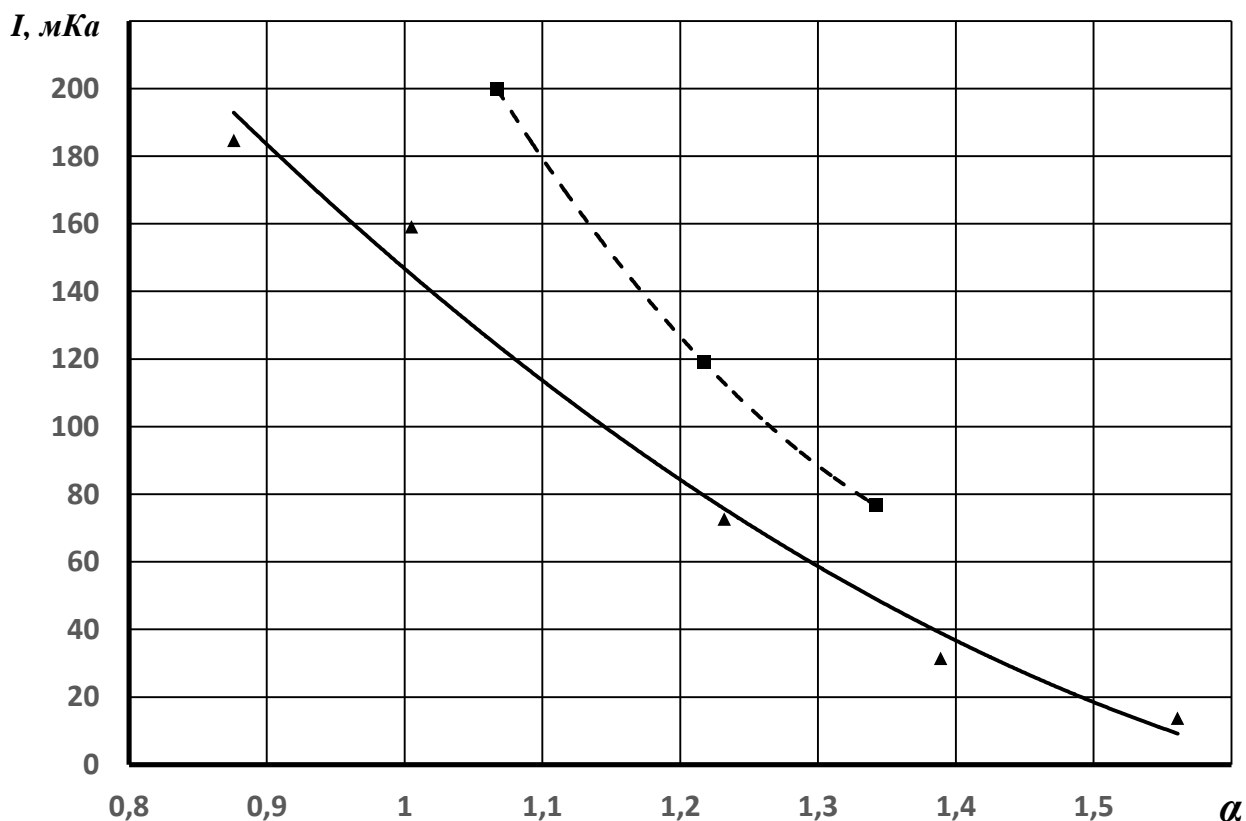


Рисунок 4.7 – Сравнение сигналов с цепи третьего зонда ионизационного датчика при двух режимах вращения коленчатого вала 600 и 900 мин⁻¹ с добавкой водорода 5%.

--- $I_{C_3} = f \alpha$, при скоростном режиме 900 мин⁻¹.
 — $I_{C_3} = f \alpha$, при скоростном режиме 600 мин⁻¹.

Построим общий график зависимости сигналов с цепи третьего зонда ионизационного датчика от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.8.

Из графика на рисунке 4.8 можно видеть, что ионные токи имеют примерно равные значения при добавке водорода 3% и 5%, что говорит о примерном одинаковом влиянии на интенсивность турбулентное распространение пламени. Так же можно видеть, что на более бедных смесях при добавке водорода значения совпадают на всех режимах и при обеих добавках водорода.

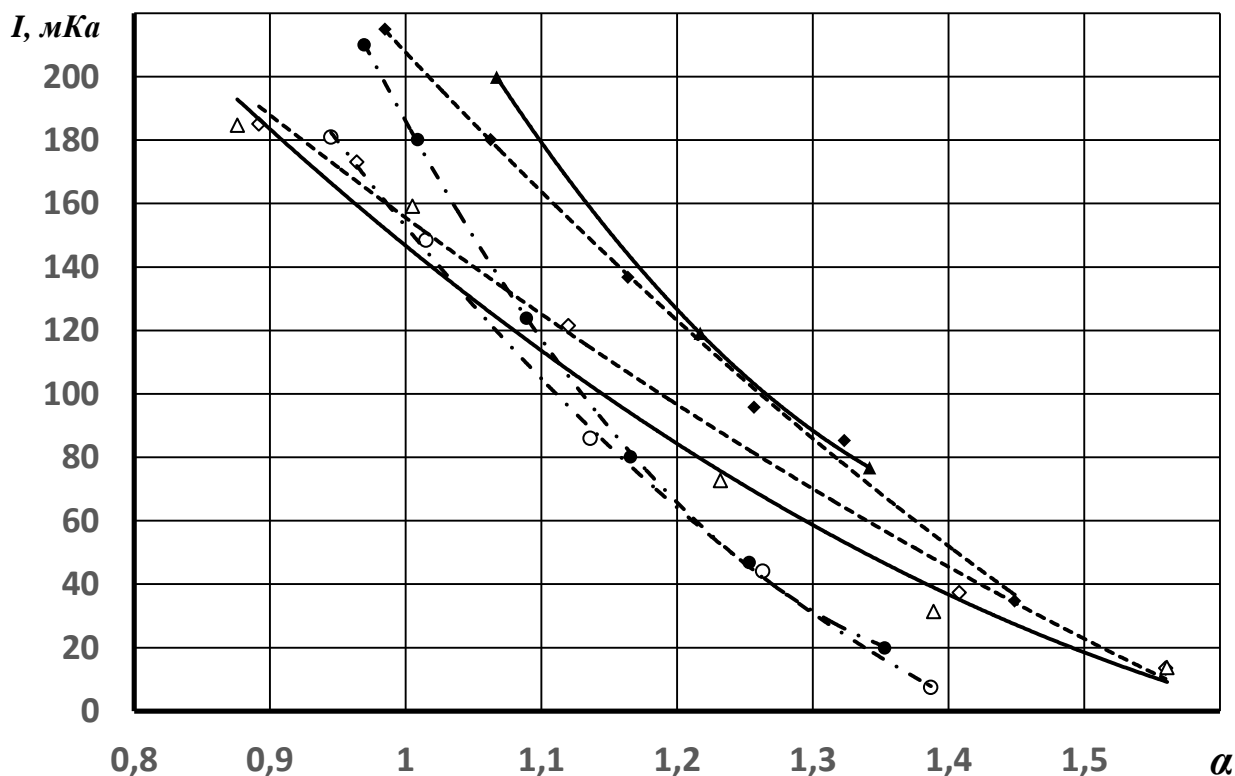


Рисунок 4.8 – Обобщенный график сигналов с цепи третьего зонда ионизационного датчика при двух режимах вращения коленчатого вала 600 и 900 мин⁻¹.

● – Сигнал ионного тока третьего зонда при $n=900$ мин⁻¹ и $H_2=0\%$; ◆ – Сигнал ионного тока третьего зонда при $n=900$ мин⁻¹ и $H_2=3\%$; ▲ – Сигнал ионного тока третьего зонда при $n=900$ мин⁻¹ и $H_2=5\%$; ○ – Сигнал ионного тока третьего зонда при $n=600$ мин⁻¹ и $H_2=0\%$; ◇ – Сигнал ионного тока третьего зонда при $n=600$ мин⁻¹ и $H_2=3\%$; △ – Сигнал ионного тока третьего зонда при $n=600$ мин⁻¹ и $H_2=5\%$;

Так же можно наблюдать то, что на скоростном режиме 900 мин⁻¹ влияние добавки водорода 5% относительно без нее примерно одинаково на всем протяжении изменения коэффициента избытка воздуха.

с. Анализ скоростей распространения пламени.

Построим общий зависимостей скоростей от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.9.

Как видно из данного графика турбулентное распространения пламени значительно выше распространения пламени в полости ионизационного датчика, это обуславливается, скорее всего, тем, что скорость в полости ионизационного датчика протекает по ламинарному механизму, то есть при нормальной скорости распространения пламени. Таким образом, с добавкой водорода нормальная, то есть ламинарная, составляющая скорости распространения в полости ионизационного датчика претерпевает основные изменения.

Так же видно то, что в скорость распространения пламени в полости ионного датчика почти не зависит от увеличения степени сжатия. Она имеет различия лишь при добавке водорода, то есть с увеличением турбулентности. Из этого следует то, что в полости ионизационного датчика скорость протекает по нормальной скорости распространения пламени. С увеличением водорода увеличивается и нормальная скорость распространения пламени, которая зависит от физико–химических свойств топливо–воздушной смеси, как было сказано выше.

С увеличением степени сжатия, получен прирост турбулентной скорости распространения пламени. Это объясняется увеличением давления в камере сгорания и как следствие увеличением турбулентности. Без добавки водорода получен прирост турбулентной скорости распространения пламени порядка 3–4 м/с. С добавкой водорода уже наблюдается больший прирост турбулентной скорости распространения пламени, порядка 5 м/с при коэффициентах избытка воздуха 1,1 – 1,4.

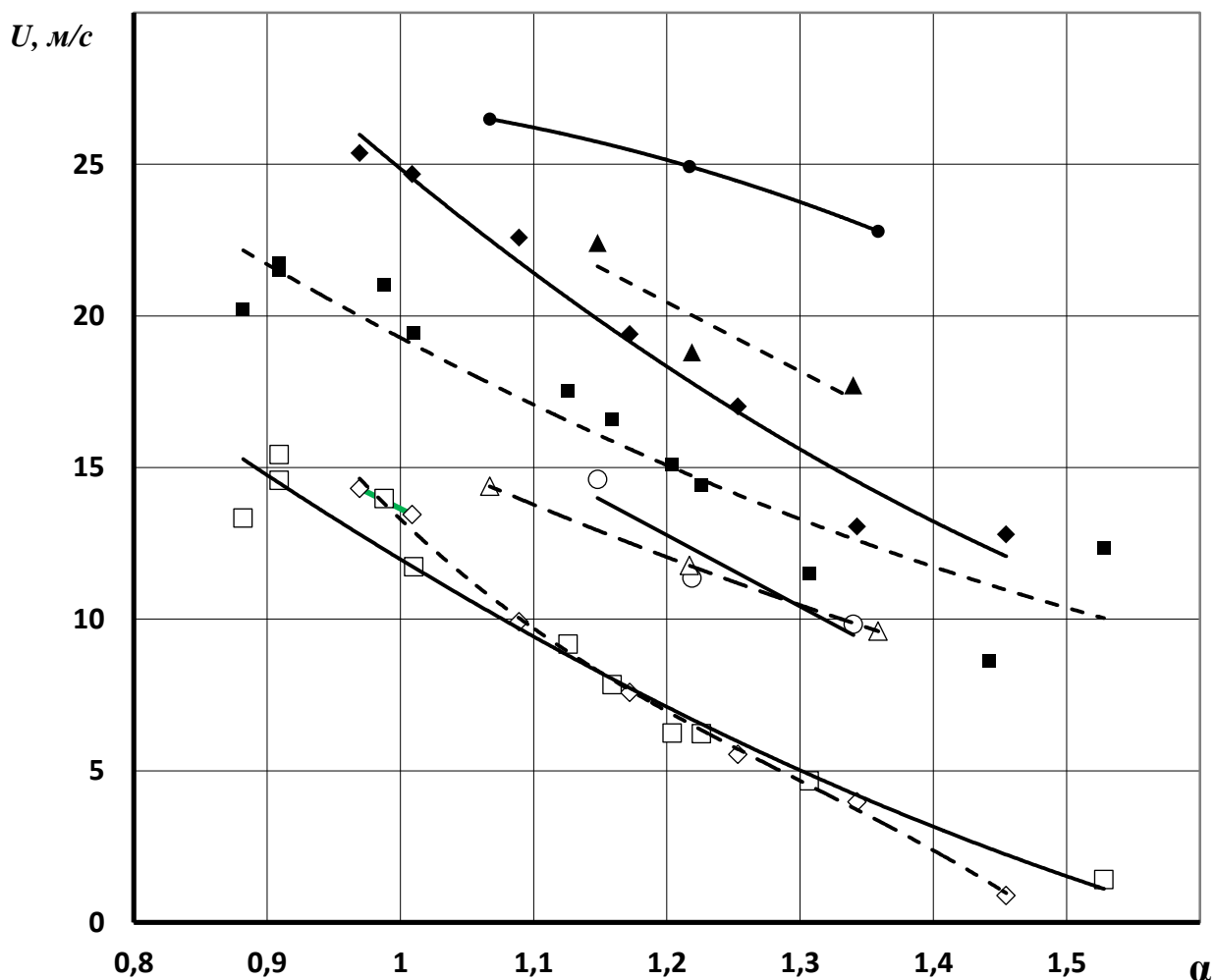


Рисунок 4.9 – Обобщенный график скоростей в полости датчика и турбулентных скоростей.

■ – Турбулентная скорость при $\varepsilon = 5,9$ и $H_2 = 0\%$; ▲ – Турбулентная скорость при $\varepsilon = 5,9$ и $H_2 = 5\%$; ◆ – Турбулентная скорость при $\varepsilon = 7$ и $H_2 = 0\%$; ● – Турбулентная скорость при $\varepsilon = 7$ и $H_2 = 5\%$; □ – Скорость в полости датчика при $\varepsilon = 5,9$ и $H_2 = 0\%$; ○ – Скорость в полости датчика при $\varepsilon = 5,9$ и $H_2 = 5\%$; ◇ – Скорость в полости датчика при $\varepsilon = 7$ и $H_2 = 0\%$; △ – Скорость в полости датчика при $\varepsilon = 7$ и $H_2 = 5\%$;

Так же при одних степенях сжатия и добавке водорода 5% наблюдается значительный рост турбулентной скорости распространения пламени, порядка 5 м/с на степени сжатия 5,9 и около 7 м/с на степени сжатия 7, при коэффициентах избытка воздуха 1,1 – 1,4. Зона горения достаточно мала, тогда в этом случае с искривлением фронта пламени не будет изменяться структура зоны горения, будет только увеличиваться поверхность пламени. За счет этого нормальная скорость распространения пламени останется без

изменений. Общее количество газа, которое сгорает за единицу времени, увеличится на столько, на сколько увеличится поверхность фронта пламени. Из этого следует то, что нормальная скорость распространения не имеет зависимости от гидродинамических характеристик, а имеет зависимость лишь от физико–химических свойств топливо–воздушной смеси. Как говорилось ранее, водород положительно влияет на физико–химические свойства топливо–воздушной смеси.

В первом приближении можно предположить то, что увеличение турбулентной скорости распространения пламени имеет место только из–за роста интенсивности турбулентности рабочего тела. Так же можно предположить, что разница между турбулентной скоростью распространению пламени и скоростью в полости ионизационного датчика указывает на интенсивность протекания турбулентности в камере сгорания.

Проведем анализ полученных скоростей распространения пламени при различных условиях. Рассмотрим разницу скорость распространения пламени в полости ионизационного датчика при влиянии добавки водорода, которую можно определить по формуле:

$$\Delta U_{kH_2} = U_k H_2 = 5\% - U_k(H_2 = 0\%), \quad (4.1)$$

По полученным значениям, которые представлены в приложении А, построим график разницы скорости в полости ионизационного датчика от коэффициента избытка воздуха при добавке водорода 5%, который представлен на рисунке 4.10.

Из полученного графика можно выделить то, что при добавке водорода скорость распространения пламени в полости ионизационного датчика имеет разницу в среднем 5 м/с с добавкой водорода 5%, то есть прирост скорости в полости ионизационного датчика за счет добавки водорода составляет примерно 5 м/с на всем протяжении изменения коэффициента избытка воздуха.

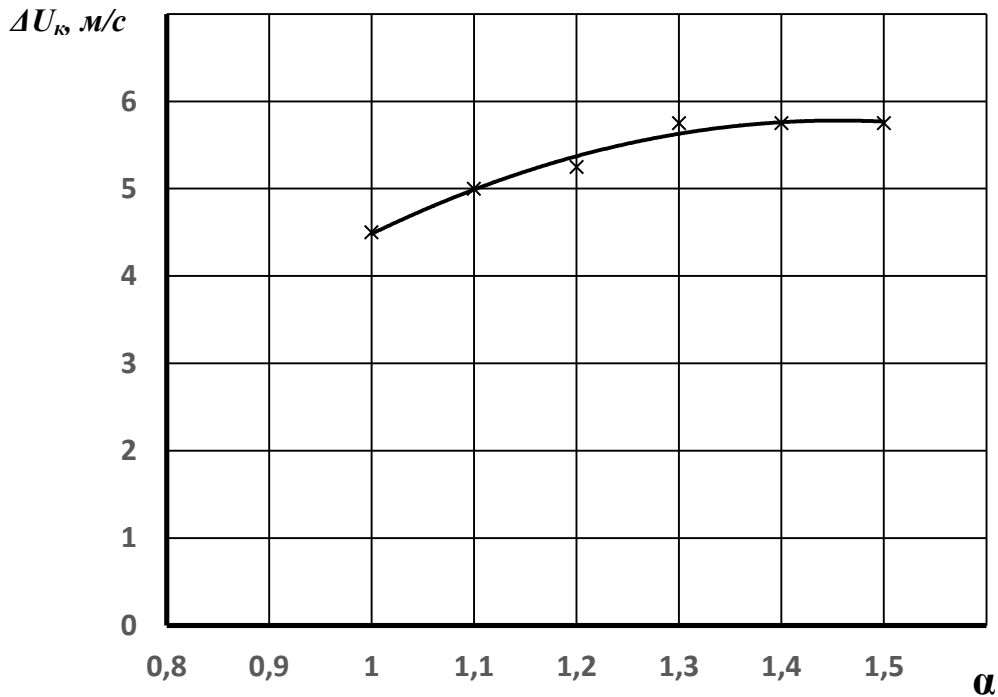


Рисунок 4.10 – График разницы скорости в полости ионизационного датчика от коэффициента избытка воздуха при добавке водорода 5%.

Как было сказано ранее, степень сжатия не влияет на нормальную составляющую скорости распространения в полости ионизационного датчика. Тогда можно предположить:

$$\Delta U_k = U_k \varepsilon = 7 - U_k \varepsilon = 5,9 \approx 0, \quad (4.2)$$

Рассмотрим прирост скорости распространения пламени в полости ионизационного датчика от добавки водорода в относительных величинах, которую можно получить по формуле:

$$U_k = \frac{\Delta U_{k_{H_2}}}{U_{k(H_2 = 0)}}, \quad (4.3)$$

Подставим полученные значения, которые представлены в приложение А, и получим график относительного прироста скоростей в зависимости от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.11.

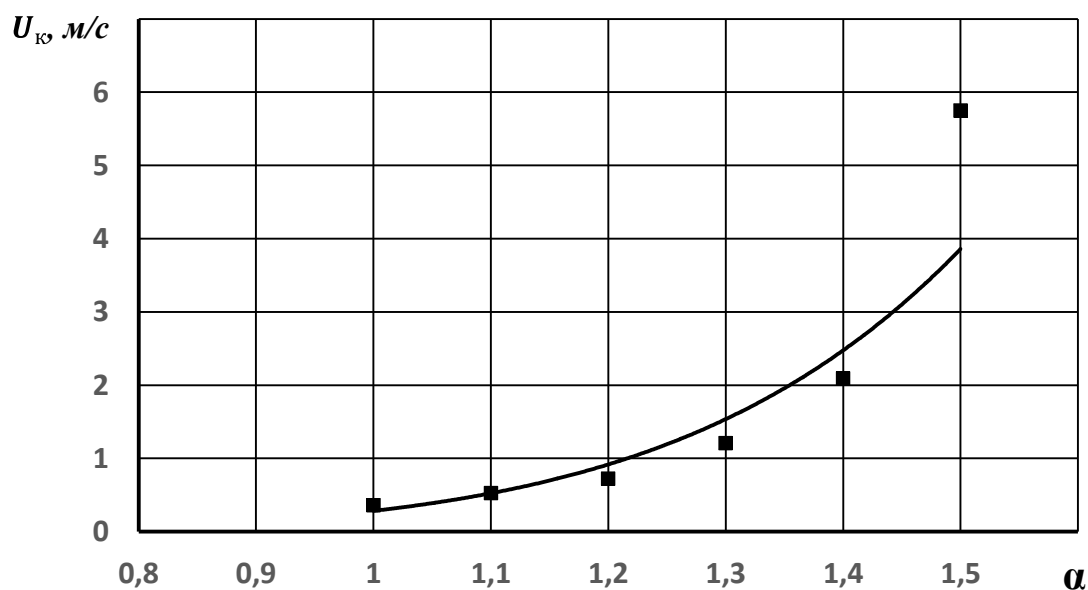


Рисунок 4.11 – График относительного прироста скоростей в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Прирост скорости распространения пламени в полости ионизационного датчика в относительных величинах составляет примерно 1 – 3 м/с в пределах коэффициента избытка воздуха от 1,1 до 1,4. Так же большой прирост наблюдается на обедненных смесях, при завершении сгорания водород за счет своих физико–химических свойств увеличивает нормальную скорость распространения пламени.

Далее рассмотрим разницу турбулентных скоростей распространения пламени. В первую очередь найдем разницу между турбулентными скоростями распространения пламени при увеличении степени сжатия, которая определяется по формуле:

$$\Delta U_t = U_t \varepsilon = 7 - U_t \varepsilon = 5,9 , \quad (4.4)$$

Подставим полученные значения, которые представлены в приложение Б, и получим график разницы турбулентной скорости распространения пламени при увеличении степени сжатия в зависимости от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.12.

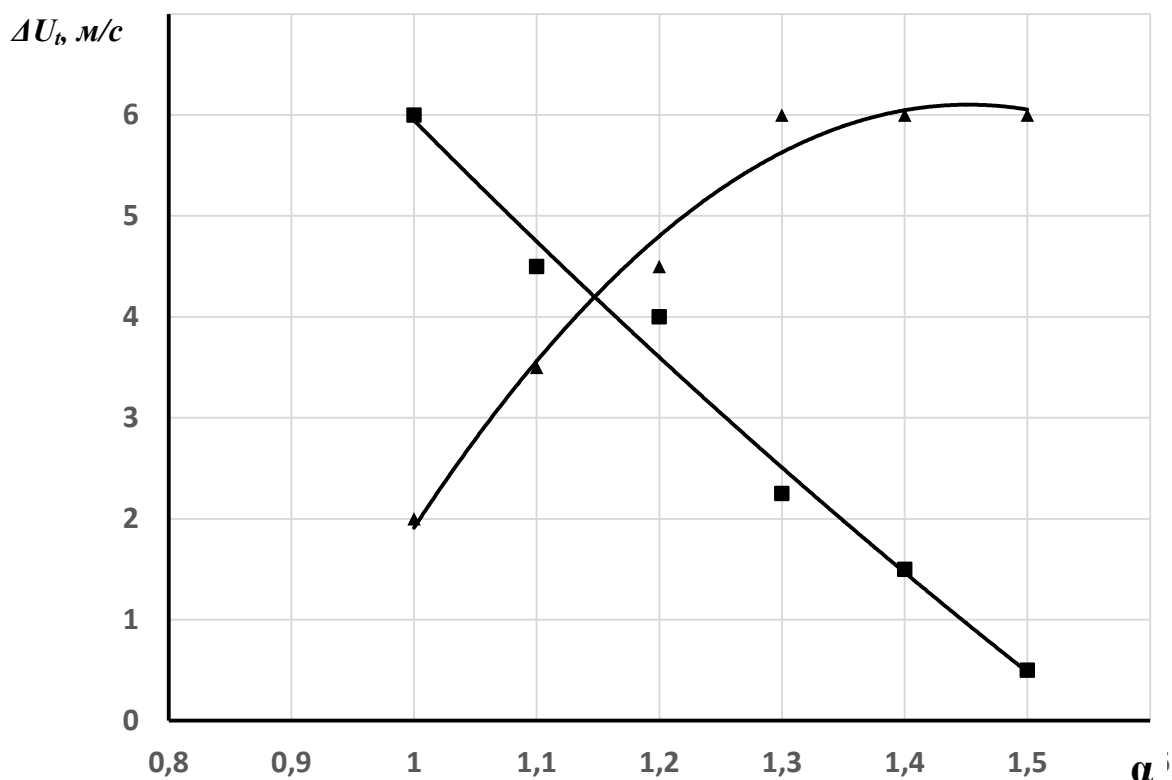


Рисунок 4.12 – График зависимости турбулентной скорости при разных степенях сжатия от коэффициента избытка воздуха.

■ – Разница турбулентной скорости при $H_2 = 0\%$.

▲ – Разница турбулентной скорости при $H_2 = 5\%$.

Без добавки водорода разница между турбулентными скоростями распространения пламени почти не наблюдается на бедных смесях, в частности при коэффициенте избытка воздуха 1,5. При достаточно бедных смесях сгорание затухает, в данном случае без активатора горения сгорание не будет продолжаться и прекратится.

Однако с добавкой водорода можно видеть значительную разницу при бедных смесях. Водород в роли активатора горения, положительно влияет на нормальную скорость распространения пламени и как следствие на турбулентную скорость распространения пламени, что приводит к нормальному процессу сгорания на обедненных смесях.

Так же к этому прибавляется влияние степени сжатия на турбулентность. За счет увеличения давления в камере сгорания и возрастает

турбулентность, что дает прирост турбулентной скорости распространения пламени, от 2 до 6 м/с на коэффициентах избытка воздуха от 1 до 1,5.

Рассмотрим разницу турбулентной скорости распространения пламени при различной добавке водорода, которая можно определить по формуле:

$$\Delta U_{t_{H_2}} = U_{t_{H_2}} = 5\% - U_{t_{H_2}} = 0\% , \quad (4.5)$$

Подставим полученные значения, которые представлены в приложение Б, и получим график разницы турбулентной скорости распространения пламени при добавке водорода в зависимости от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.13.

При степени сжатия 5,9 разница турбулентной скорости распространения пламени примерно одинакова при всех значениях коэффициента избытка воздуха и находится в пределах от 4 до 6 м/с. Однако при степени сжатия 7 разница имеет значительное увеличение от 2 м/с до 9 м/с на протяжении всех значений коэффициента избытка воздуха. При большей степени сжатия, а так же добавке водорода значительно возрастает турбулентная скорость распространения пламени. В первую очередь за счет уменьшения камеры сгорания в момент сгорания и как следствие увеличение давления, а так же за счет добавки водорода, которая за счет своих физико-химических свойств увеличивает турбулентную скорость распространения пламени.

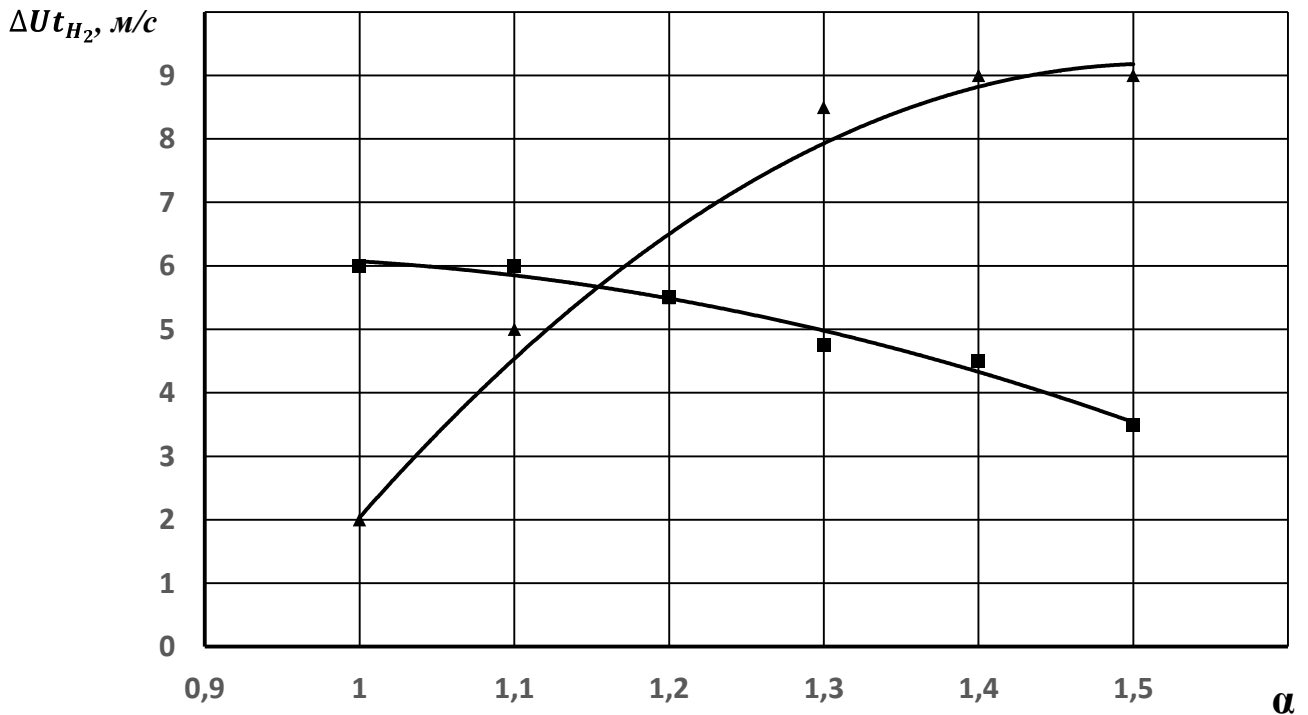


Рисунок 4.13 – График разницы турбулентной скорости при добавке водорода в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

■ – Разница турбулентной скорости при $\varepsilon = 5,9$; ▲ – Разница турбулентной скорости при $\varepsilon = 7$.

Рассмотрим прирост турбулентной скорости распространения пламени в относительных величинах. Прирост турбулентных скоростей распространения пламени без добавки водорода, определяется по формуле:

$$Ut = \frac{\Delta Ut}{Ut_{H_2 = 0\%}}, \quad (4.6)$$

Подставим полученные значения, которые представлены в приложение Б, и получим график, который представлен на рисунке 4.14.

Прирост скорости турбулентной распространения пламени в относительных величинах

В относительных величинах прирост турбулентной скорости без добавки имеет различия между степенями сжатия в 5% при коэффициенте избытка воздуха. При дальнейшем обедни смеси прирост скорости в относительных величинах становится равным.

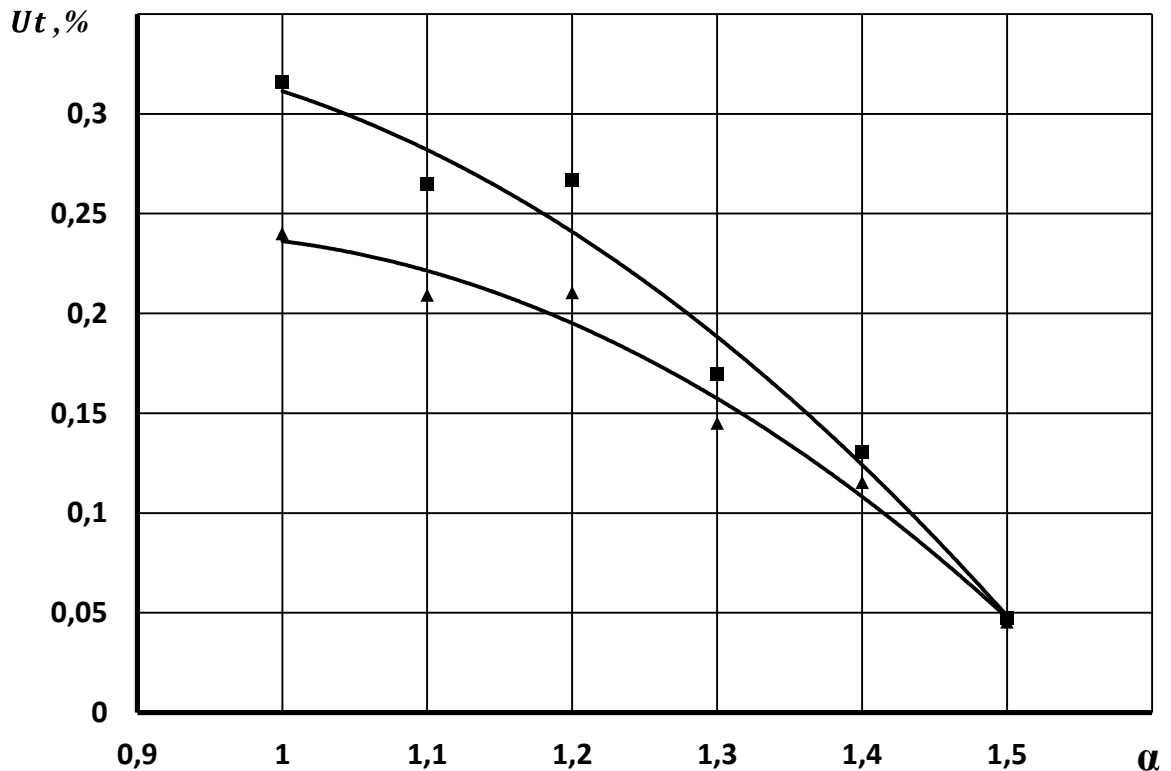


Рисунок 4.14 – График прироста турбулентной скорости распространения пламени без добавки водорода в относительных величинах в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

■ – Относительный прирост скорости при $\varepsilon = 5,9$; ▲ – Относительный прирост скорости при $\varepsilon = 7$.

Рассмотрим прирост турбулентной скорости в относительных величинах с добавкой водорода, который определяется по формуле:

$$Ut' = \frac{\Delta Ut}{\Delta U_{t H_2}}, \quad (4.7)$$

Подставим полученные значения, которые представлены в приложение Б, и получим график зависимости прироста турбулентной скорости распространения пламени в относительных величинах с добавкой водорода в зависимости от коэффициента избытка воздуха, который представлен на рисунке 4.15.

С добавкой водорода прирост турбулентной скорости в относительных величинах имеет схожий характер на обеих степенях сжатия. Так же прирост в относительных величинах примерно равен на обеих степенях сжатия.

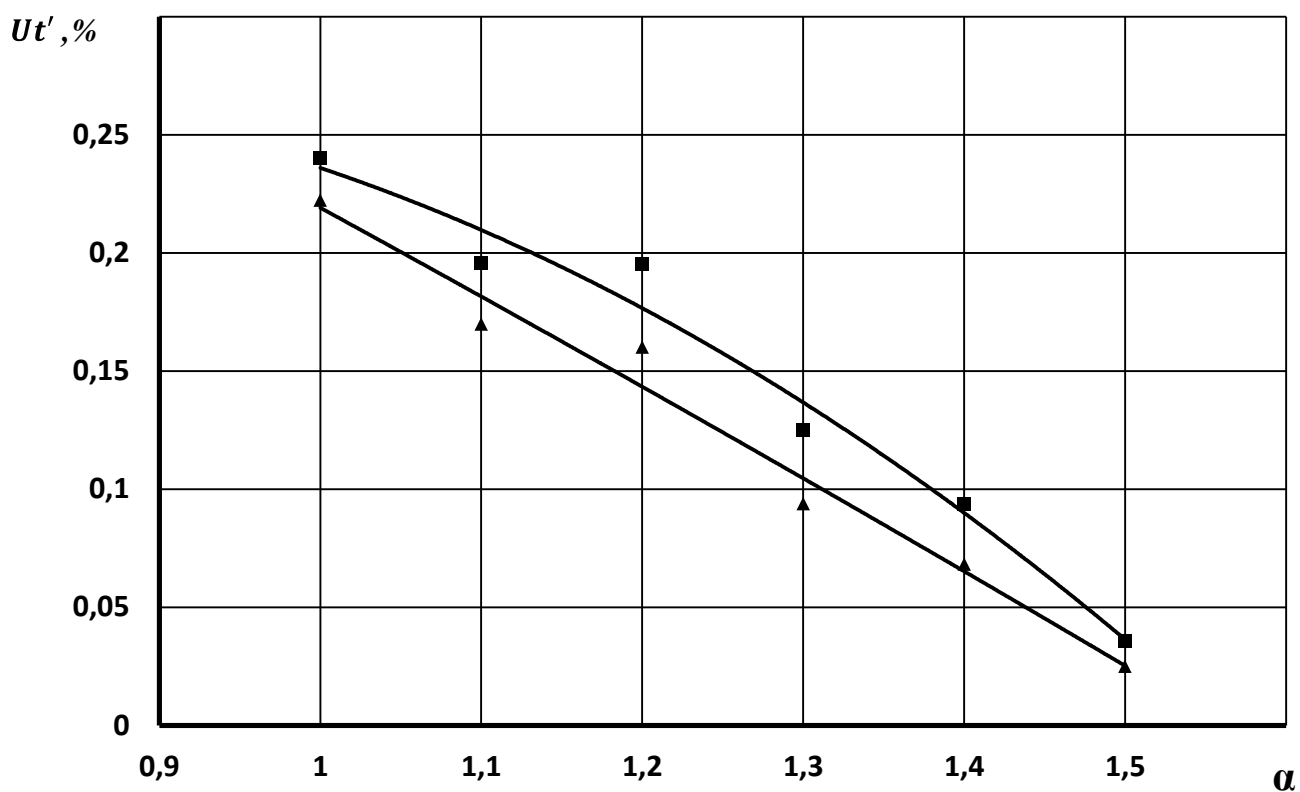


Рисунок 4.15 – График прироста турбулентной скорости распространения пламени с добавкой водорода в относительных величинах в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

■ – Относительный прирост скорости при $\varepsilon = 5,9$; ▲ – Относительный прирост скорости при $\varepsilon = 7$.

Из всего выше сказанного можно отметить, что максимальные различия в скоростях наблюдаются при бедных смесях, а также при добавке водорода в 5%

Заключение

Полученные результаты, представленные в работе по анализу и обобщению современных экспериментальных и теоретических исследований дают возможность сформулировать следующие выводы:

1. С добавкой водорода в топливо–воздушной смеси как в основной, так и в конце этапа сгорания идет увеличение интенсивности турбулентной скорости распространения пламени.

2. Анализ различных характеристик скоростей распространения пламени, а так же ионного тока в полости ионизационного датчика говорит о том, что в конце этапа сгорания с добавкой водорода имеет место увеличения нормальной скорости распространения пламени.

3. Увеличение степени сжатия, то есть уменьшении камеры сгорания и как следствие увеличение давления положительно сказывается на росте турбулентного распространения пламени.

4. Увеличение степени сжатия, так же увеличивает ионный ток равномерно на всех изменениях коэффициента избытка воздуха.

5. Анализ данных по ионному току и скорости распространения пламени показал, что в камере сгорания интенсивность протекания химических реакций в полости ионизационного датчика зависит от степени сжатия и состава смеси и не зависит от изменения турбулентности, то есть от оборотов коленчатого вала.

6. Добавка водорода в 5% дает рост турбулентного распространения пламени, а так же скорости в полости ионного датчика, в среднем на 5 м/с, что положительно сказывается на протекании процесса горения. Это говорит о том, что использование углеводородной смеси имеет перспективы для применения в автомобильных двигателях.

Для более точного и глубокого исследования характеристик турбулентной и нормальной скоростей распространения пламени требуются

проведения исследований и к тому же необходимо производство более точных специальных датчиков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Alliat, I. Hydrogen refuelling stations example of a safety study for a hydrogen – natural gas refuelling station / I. Alliat, S. Chelhaoui, I. Perrette // WHEC 16. – 2006.
2. Andersson I., Cylinder Pressure and Ionization Current Modeling for Spark Ignited Engines, Linkopings Universitet, SAE 581 83 Linkoping, Sweden, 2002
3. Andrea T. D., Henshaw P. F., Ting D. S. The addition of hydrogen to a gasoline – fuelled SI engine // International journal of hydrogen energy. – 2004. – № 29. – P. 1541-1552.
4. Annual energy outlook 2013. – Independent statistics & analysis, 2013.
5. Auzins J., H. Johansson and J. Nytomt Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock, and Engine Control. SAE 950004 105 – 109
6. BP energy outlook 2030. – BP, 2013.
7. BP statistical review of world energy. – BP, 2014.
8. Cummins Westport engines run on hydrogen blended natural gas // Cummins Westport inc. – 2007.
9. Deltoro, A. Development and demonstration of hydrogen and compressed natural gas (H/CNG) blend transit buses / A. Deltoro, M. Frailey, F. Lynch // Technical Report NREL/TP-540-38707. – 2005.
10. Dunn-Rankin D. Lean combustion: technology and control. – Elsevier, 2008.
11. Gao, Z. Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas/hydrogen blends with BSS de-noising method / Z. Gao, X. Wu, H. Gao, B. Liu // International journal of hydrogen energy. – 2010. – № 35. – P. 12918 – 12929.

12. Hellring M., T. Munter, T. Rögnvaldsson, N. Wikström, C. Carlsson, M Larsson and J. Nytomt. Robust AFR Estimation Using Ion Current and Neural Networks. SAE 1999-01-1161
13. Hu, E. J. Experimental and numerical study on lean premixed methane–hydrogen-air flames at elevated pressures and temperatures / E. J. Hu, Z. H. Huang, J. He, H. Miao // International journal of hydrogen energy. – 2009. – № 34. – P. 6951–6960.
14. Hu, E. J. Experimental investigation on performance and emissions of a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR / E. J. Hu, Z. H. Huang, B. Liu, J. J. Zheng // Hydrogen Energy. – 2009. – № 34(1). – P. 528–539.
15. Hu, E. J. Experimental study on combustion characteristics of a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combining with EGR / E. J. Hu, Z. H. Huang, B. Liu, J. J. Zheng // Hydrogen Energy. – 2009. – № 34(2). – P. 1035–1044.
16. Huang, Z. H. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures / Z. H. Huang, Y. Zhang, K. Zeng, B. Liu // Combustion and Flame. – 2006. – № 146. – P. 302–311.
17. Iacobazzi, A. Use of blends of hydrogen and natural gas in urban vehicles in the transition towards an hydrogen economy / A. Iacobazzi // WIH. – 2007.
18. Jurgen Forster, Achim Gunter, Marcus Ketterer, Klaus Jurgen. Ion Current Sensing for Spark Ignition Engines. SAE Paper 1999-01-0204.
19. Karner, D. High-percentage hydrogen/CNG blend Ford F-150 operating summary / D. Karner, J. Francfort // Technical report Idaho national engineering and environmental laboratory. – 2003.
20. Liberman M. Introduction to physics and chemistry of combustion. – Springer, 2008.

21. Ma, F. Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine / F. Ma, Y. Wang, H. Q. Liu, Y. Li // *Hydrogen Energy*. – 2007. – № 32. – P. 5067–5075.
22. Ma, F. Hydrogen-enriched compressed natural gas as a fuel for engines // F. Ma, N. Naeve, M. Wang, L. Jiang // *Natural Gas*. – 2010. – P. 606.
23. Ma, F. Influence of different volume percent hydrogen/natural gas mixtures on idle performance of a CNG engine / F. Ma, J. Wang, Y. Wang, Y. Li // *Energy & Fuels*. – 2008. – № 22. – P. 1880-1887.
24. Ma, F. Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark ignition engine / F. Ma, Y. Wang // *Hydrogen energy*. – 2008. – №33. – P. 1416–1424.
25. Ma, F. Twenty percent hydrogen-enriched natural gas transient performance research / F. Ma, Y. Wang, S. Ding, L. Jiang // *Hydrogen energy*. – 2009. – № 34. – P. 6523-6531.
26. Mao, Z. HCNG in China / Z. Mao // *3rd international H fuel Forum*. – 2010.
27. Morrone, B. Numerical investigation on the effects of natural gas and hydrogen blends on engine combustion / B. Morrone, A. Unich // *Hydrogen energy*. – 2009. – № 34. – P. 4626-4634.
28. Nanthagopal, K. Hydrogen enriched compressed natural gas - a futuristic fuel for internal combustion engines / K. Nanthagopal, R. Subbarao, T. Elango, P. K. Baskar // *Thermal science*. – 2011. – № 4. – P. 1145-1154.
29. Nicolae Apostolescu and Radu Chiriac. A Study of Combustion of Hydrogen-Enriched Gasoline in a Spark Ignition Engine. SAE 960603.

30. Saitzkoff A., R. Reinmann, F. Mauss and M. Glavmo In-Cylinder Pressure Measurements Using the Sparg Plug as an Ionization Sensor. SAE 970857
31. Spicher U.. Optical Fibre Technique as a Tool to Improve Combustion Efficiency SAE paper, 902138, 1990.
32. Thiele M., Selle S., Riedel U., «Warnatz and Maas numerical simulation of spark ignition including ionization» SAE paper, 1302138, 2000.
33. Tyagi R. K., Ranjan R. Effect of hydrogen and gasoline fuel blend on the performance of SI engine // Journal of petroleum technology and alternative fuels. – 2013. - № 4 (7). – P. 125-130.
34. Upadhyay D., Rizzoni G. AFR Control on a Single Cylinder Engine Using the Ionization Current. SAE 980203
35. VanDyne E.A., C.L. Burcmyer, A.M. Wahl and A.E. Funaioli Misfire Detection from Ionization Feedback Utilizing the Smart fire Plasma Ignition Technology. SAE 2000-01-1377
36. Wang C. S. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignition gasoline engine at 800 rpm and lean conditions // Proceedings 18th world hydrogen energy conference 2010. – 2010. – P. 175-180.
37. Witze P.O., Martin J.K., Borgnakke C. Measurement and prediction of the precombustion fluid motion and combustion rates in a spark ignition engine. –SAE Techn. Pap. Ser.-№831697, 1983
38. Yutaka Ohashi, Mitsuru Koiwa, Koichi Okamura and Atsushi Ueda. The Application of Ionic Current Detection System for the Combustion Control. SAE Paper 1999-01-0550.
39. Бортников Л. Н. Особенности горения бензоводородовоздушной смеси в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания и определение оптимального соотношения бензин - водород // Физико горения и взрыва. – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 8-14.

- 40.Брызгалов, А. А. Добавка водорода в метановоздушную смесь газового двигателя / А. А. Брызгалов, А. П. Шайкин. – Тольятти, 2010.
- 41.Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- 42.Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя - Москва-Свердловск, Машгиз, 1962.
- 43.Вибе И.И. Теория двигателей внутреннего сгорания // Конспект лекций. - Челябинск, 1974
- 44.Воинов А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977.
- 45.Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. - М.: Машиностроение, 1972.
- 46.Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. ДВС: Теория поршневых и комбинированных двигателей. - М.: Машиностроение, 1983.
- 47.Галиев И.Р. Характеристики распространения пламени в метановодородовоздушной смеси и концентрация несгоревших углеводородов в отработавших газах газопоршневых двигателей/ Кандидатская диссертация. Тольятти. 2013, 146 с.
- 48.Галиев Р. С., Галиева С. А., Тыртыгин В. Н. Воздух рабочей зоны водителя автомобиля как фактор риска развития аллергических заболеваний // Охрана труда. Практикум. – 2007. – № 8. – С. 93-102.
- 49.Галиев Р. С., Галиева С. А., Худобердиева Т. И. Особенности развития аллергической реакции в условиях воздействия выхлопных газов автотранспорта различной интенсивности // Экология человека. – 2007. – № 10. – С. 21-26.

50. Гатауллин, Н. А. Влияние добавок водорода на экономические и экологические показатели газового двигателя Камаз-820.53-260 / Н. А. Гатауллин, Ю.Ф. Гортышов, В. М. Гуреев, К. В. Нефёдов и др. // Материалы конференции «Водородная энергетика». – 2007. – С. 136-138.
51. Генкин К.И. Рабочий процесс и сгорания в двигателе с искровым зажиганием. - М.: Машиностроение, 1949.
52. Головина Е.С., Федоров П.Г. Влияние физико-химических факторов на скорость распространения пламени // В кн.: Исследование процессов горения - М.: АН СССР, 1958, с. 44 – 55
53. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей. / А.С. Орлин, Д.Н. Вырубов, В.И. Ивин и др. - М.: Машиностроение, 1983, изд. 4.
54. Ивашин П. В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока: Дис. канд. тех. наук / Тольяттинский государственный университет. – Тольятти, 2004.,
55. Ивашин П.В., Коломиец П.В., Шайкин А.П., Строганов В.И. Электропроводность пламени, средняя скорость сгорания и концентрация несгоревших углеводородов в ОГ бензиновых двигателей / Автотракторное электрооборудование № 1-2. 2004, с. 38 - 39.
56. Иноземцев Н.В. Ионизация в ламинарных пламенах. в кн. "Стабилизация пламени и развитие процесса сгорания в турбулентном потоке" под ред. Горбунова Г.Н., - Оборонгиз, 1961.
57. Иноземцев Н.В., Кошкин В.К., Процесс сгорания в двигателях, Под Общ. ред. Н.В. Иноземцева, М., изд-во 1-я тип. Машгиза в Лгр., 1949

58. Коломиец П. В. Влияние скорости распространения пламени на выделения оксидов азота при добавке водорода в бензиновые двигатели: Дис. канд. тех. наук / Тольяттинский государственный университет. – Тольятти, 2007.
59. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения топлива. - М.: Наука, 1971.
60. Лернер М.О., Регулирование процесса горения в двигателях с искровым зажиганием. - М., Наука, 1972.
61. Мисбахов, Р. Ш. Влияние добавок водорода на технико-экономические и экологические показатели газовых и дизельных двигателей: автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.04.02 / Мисбахов Ринат Шаукатович. – Казань, 2010. – 20 с.
62. Основы горения углеводородных топлив. / Пер. с англ. Под ред. Л.Н. Хитрина и В.А. Попова. - М.: ИЛ, 1960.
63. Петриченко Р.М., Оносовский В.В. Рабочие процессы поршневых машин. - М., Машиностроение, 1972.
64. Покровский Г.П. Электроника в системах топлива автомобильных двигателей. - М.: Машиностроение, 1990.
65. Российская АН, научный совет по горению и взрыву, Институт макрокинетики и проблем материаловедения РАН. Концепция развития горения и взрыва как области научно-технического прогресса: Изд. «Территория». – 2001
66. Сабденов К. О., Долматов О. Ю., Юшицын К. В. К выяснению природы концентрационного предела горения // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – № 4. – С. 41-46.
67. Семенов Е.С., Соколик А.С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя. / Известия АН СССР, 1958.
68. Соколик А.С. Основы теории процесса нормального сгорания в двигателях с искровым зажиганием. - М.: АН СССР, 1951.

69. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. - М.: Металлургия, 1968.
70. Шайкин А. П., Ивашин П. В., Галиев И. Р. Влияние скорости распространения и ионизации пламени на концентрацию несгоревших углеводородов в газовом ДВС // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – № 4. – С. 248-252.
71. Шайкин А.П., Ахремочкин О.А., Цибизов Ю.И., Ивашин П.В. Скорость сгорания в цилиндре поршневого ДВС и концентрация несгоревших углеводородов в отработанных газах. // МНПК Современные тенденции развития автомобилестроения в России, - Тольятти, 2003, с.167-172.
72. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Будаев С.И. О возможных причинах снижения концентрации несгоревших углеводородов при добавке водорода в ТВС ДВС. // МНПК Прогресс транспортных средств и систем, - Волгоград, 2002, с.136-140.
73. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р., Бобровский А.В., Дерячев А.Д., Дурманова Н.А. Взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов с шириной зоны турбулентного горения при сгорании топливно-воздушной смеси с добавкой водорода // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – 2017. – № 1. – С. 64–69.
74. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Строганов В.И., Коломиец П.В. Взаимосвязь электропроводности пламени, средней скорости сгорания и концентрации несгоревших СН в ОГ бензиновых двигателей. // ВНТК Современные тенденции развития автомобилестроения в России, - Тольятти, 2004, с.138-140.
75. Шайкин А.П., Русаков М.М., Пелипенко В.Н., Ахремочкин О.А. Возможности снижения токсичности отработанных газов

городских автобусов. // НПК Безопасность транспортных систем
- Самара, 2002.

76.Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. – АН СССР,
1963.

Приложение А

Таблица А.1 – Разница скоростей распространения пламени в полости ионизационного датчика при влиянии добавки водорода.

α	$U_k H_2 = 5\%$	$U_k(H_2 = 0\%)$	ΔU_{kH_2}
1,0	17,00	12,50	4,50
1,1	14,50	9,50	5,00
1,2	12,50	7,25	5,25
1,3	10,50	4,75	5,75
1,4	8,50	2,75	5,75
1,5	6,75	1,00	5,75

Таблица А.2 – Прирост скорости распространения пламени в полости ионизационного датчика от добавки водорода в относительных величинах.

α	$U_k(H_2 = 0\%)$	ΔU_{kH_2}	U_k
1,0	12,50	4,50	0,36
1,1	9,50	5,00	0,53
1,2	7,25	5,25	0,72
1,3	4,75	5,75	1,21
1,4	2,75	5,75	2,09
1,5	1,00	5,75	5,75

Приложение Б

Таблица Б.1 – Разница между турбулентными скоростями распространения пламени при увеличении степени сжатия с добавкой водорода.

α	$Ut \ \varepsilon = 7$	$Ut \ \varepsilon = 5,9$	ΔUt
1,0	27,0	25,0	2,0
1,1	26,5	23,0	3,5
1,2	25,0	20,5	4,5
1,3	24,0	18,0	6,0
1,4	22,0	16,0	6,0
1,5	20,0	14,0	6,0

Таблица Б.2 – Разница между турбулентными скоростями распространения пламени при увеличении степени сжатия без добавки водорода.

α	$Ut \ \varepsilon = 7$	$Ut \ \varepsilon = 5,9$	ΔUt
1,0	25,0	19,00	6,00
1,1	21,5	17,00	4,50
1,2	19,0	15,00	4,00
1,3	15,5	13,25	2,25
1,4	13,0	11,50	1,50
1,5	11,0	10,50	0,50

Таблица Б.3 – Разница турбулентной скорости распространения пламени при различной добавке водорода при степени сжатия 7.

α	$Ut \ H_2 = 5\%$	$Ut \ H_2 = 0\%$	ΔUt_{H_2}
1,0	27,0	25,0	2,0
1,1	26,5	21,5	5,0
1,2	25,0	19,5	5,5
1,3	24,0	15,5	8,5
1,4	22,0	13,0	9,0
1,5	20,0	11,0	9,0

Таблица Б.4 – Разница турбулентной скорости распространения пламени при различной добавке водорода при степени сжатия 5,9.

α	$Ut_{H_2 = 5\%}$	$Ut_{H_2 = 0\%}$	ΔUt_{H_2}
1,0	25,0	19,00	6,00
1,1	23,0	17,00	6,00
1,2	20,5	15,00	5,50
1,3	18,0	13,25	4,75
1,4	16,0	11,50	4,50
1,5	14,0	10,50	3,50

Таблица Б.5 – Прирост турбулентных скоростей распространения пламени без добавки водорода при степени сжатия 7.

α	ΔUt	$Ut_{H_2 = 0\%}$	U_t
1,0	6,00	25,0	0,24
1,1	4,50	21,5	0,21
1,2	4,00	19,0	0,21
1,3	2,25	15,5	0,15
1,4	1,50	13,0	0,12
1,5	0,50	11,0	0,05

Таблица Б.6 – Прирост турбулентных скоростей распространения пламени без добавки водорода при степени сжатия 5,9.

α	ΔUt	$Ut_{H_2 = 0\%}$	U_t
1,0	6,00	19,00	0,32
1,1	4,50	17,00	0,26
1,2	4,00	15,00	0,27
1,3	2,25	13,25	0,17
1,4	1,50	11,50	0,13
1,5	0,50	10,50	0,05

Таблица Б.7 – Прирост турбулентной скорости в относительных величинах с добавкой водорода при степени сжатия 7.

α	ΔU_t	$\Delta U_{t H_2}$	U_t'
1,0	6,00	27,0	0,22
1,1	4,50	26,5	0,17
1,2	4,00	25,0	0,16
1,3	2,25	24,0	0,09
1,4	1,50	22,0	0,07
1,5	0,50	20,0	0,03

Таблица Б.8 – Прирост турбулентной скорости в относительных величинах с добавкой водорода при степени сжатия 5,9.

α	ΔU_t	$\Delta U_{t H_2}$	U_t'
1,0	6,00	25,0	0,24
1,1	4,50	23,0	0,20
1,2	4,00	20,5	0,20
1,3	2,25	18,0	0,13
1,4	1,50	16,0	0,09
1,5	0,50	14,0	0,04