

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

«Тольяттинский государственный университет»
ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления
(кафедра)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»
(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели
(наименование профиля магистерской программы)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Применение ионизационного зонда для оценки скорости сгорания в
ДВС с искровым зажиганием

Студент(ка)

А.Я. Твердохлебов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

к.т.н., П. В. Ивашин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель магистерской
программы

д.т.н., профессор А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

« ____ » июня 2018 г.

Допустить к защите

Зав. кафедрой
«ЭМиСУ»

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« ____ » июня 2018 г.

Тольятти 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Анализ уровня техники и известных исследований	7
2 Экспериментальная установка и методика исследований	12
2.1 Экспериментальная установка	12
2.2 Методика проведения эксперимента	15
2.3 Методика обработки сигналов ионного тока	17
2.4 Методика обработки индикаторных диаграмм	18
3 Результаты эксперимента	25
3.1 Зависимости ионизации и скорости распространения пламени от состава смеси	25
3.2 Зависимости скорости тепловыделения и работы цикла от состава смеси	28
3.3 Взаимосвязь проводимости пламени со скоростью сгорания и работой цикла	32
3.4 Выводы по результатам эксперимента	38
3 Обсуждение результатов эксперимента	39
Заключение	48
Список используемых источников	49

Введение

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) всё ещё являются, и, видимо, в ближайшее время останутся основным источником мощности в транспорте. Их суммарная мощность в несколько раз превышает установленную мощность всех электростанций [1].

Современное развитие ДВС связано с жесткими требованиями к токсичности и топливной экономичности. Эти требования обуславливают необходимость совершенствования процесса сгорания. Совершенствование процесса сгорания ДВС не может быть достигнуто без получения системами управления и диагностики (в том числе в реальном времени) необходимой и достоверной информации о процессе сгорания. Для массово производимых систем управления (СУ) и бортовой диагностики поршневых двигателей основными источниками информации о процессе сгорания являются датчики детонации и содержания кислорода в отработавших газах. Этой информации не всегда достаточно для адекватной диагностики ДВС при постоянном совершенствовании процесса сгорания. Особенно это касается вновь разрабатываемых процессов сгорания, например, таких как самовоспламенение заранее подготовленной гомогенной смеси (НССИ-процесс). Последние достижения в исследовании сгорания в ДВС связаны с применением оптических методов, основанных на взаимодействии лазерного луча и реагирующих молекул и скоростной фотосъемки [2 - 4]. Но использование дорогих исследовательских методов для целей сервисной диагностики и в системах управления двигателем представляет значительные технические трудности и экономически нецелесообразно. Следовательно, необходимы недорогие дополнительные способы получения информации о процессе сгорания в ДВС.

Кроме применения в СУ ДВС, информативные и недорогие способы получения информации о процессе сгорания необходимы для быстрого экспериментального анализа результатов конструктивных мероприятий, направленных на совершенствование процесса горения, при переводе ДВС на

альтернативные топлива. Однако использование оптических методов для экспериментальной диагностики горения в инженерной практике не всегда возможно. Например, при изменении рабочего процесса в серийных камерах сгорания (замена топлива с бензина на природный газ, например) или при исследовании горения в пограничных (пристеночных) слоях (где оптические методы плохо работают). Поэтому для исследования распространения пламени в ДВС и других энергетических установках применяют также неоптические методы, основанные, например, на явлении ионизации пламени углеводородов. Кафедра «Энергетические машины и системы управления» ТГУ регулярно принимает участие в проектах, где необходима адаптация рабочего процесса ДВС к новым смесевым топливам, поэтому развитие новой методики исследования рабочего процесса актуально.

Анализ современных тенденций показал, что перспективным для диагностики сгорания в ДВС является метод ионизационных зондов (ИЗ), основанный на проводимости пламени углеводородных топлив. Явление ионизации пламени было одним из наиболее популярных направлений в фундаментальных исследованиях 1960-1970 гг. [5 - 8]. В дальнейшем ионизация пламени активно использовалась для исследований сгорания и развития СУ ДВС [9 - 15]. Однако данный метод всё ещё находится в стадии исследований [16 - 17]. Это обусловлено значительной сложностью механизмов сгорания. Использование ИЗ для промышленного использования в диагностике ДВС требует исследований и метрологического обоснования.

Таким образом, основные проблемы разработки ДВС, на решение которых направлена настоящая работа:

- жесткие конкурентные ограничения по стоимости и времени вывода новой высокотехнологичной продукции на рынок;
- постоянно ужесточающиеся законодательные и экономические требования к топливной эффективности и токсичности;

- недостаточные возможности диагностики рабочего процесса в каждом цилиндре ДВС.

Исходя из этих проблем, сформулирована цель работы.

Цель работы – повышение эффективности и снижение токсичности ДВС путём совершенствования контроля и диагностики процесса сгорания.

Основная задача работы – развитие метода диагностики сгорания в ДВС и энергетических установках, сжигающих углеводороды, с помощью ионизации пламени для обеспечения их безотказной, экономичной работы и низкой токсичности.

Совершенство рабочего процесса ДВС во многом определяется скоростью сгорания [1]. В турбулентных условиях физическим параметром, оценивающим скорость горения, считается скорость распространения турбулентного пламени (в западной литературе – *turbulent burning velocity*). В виду сложности её определения в замкнутом объёме, в теории ДВС принято использовать скорость тепловыделения для оценки скорости сгорания [1]. Скорость сгорания является особенно важным параметром при переводе ДВС на альтернативные топлива (например, сжатый природный газ) и разработке рабочего процесса со сжиганием обедненных смесей. Поэтому перспективной задачей исследование скорости сгорания в условиях ДВС.

Анализ исследований природы ионизации пламени позволил выработать гипотезу исследования: проводимость пламени может служить информационным параметром, достаточно просто и адекватно отражающим скорость сгорания. При этом заранее расчетным образом невозможно предсказать характер данной взаимосвязи и его зависимость от основных факторов, определяющих работу ДВС. Кроме того, для метода ионизационного зонда характерна локализация исследуемой зоны в достаточно малом объёме, определяющимся размером ионизационного зонда. Для ДВС это размер электродов свечи зажигания. Поэтому также не ясно насколько информативным параметром будет являться локально измеряемая проводимость пламени для всего цикла сгорания ДВС.

В связи с этим, конкретные **задачи исследования** – выявление и анализ взаимосвязи электропроводности пламени со следующими характеристиками сгорания:

- скорость тепловыделения;
- средняя скорость распространения пламени;
- работа цикла.

Проводимость пламени взята как физический параметр, определяемый степенью ионизации пламени.

Решение поставленных задач позволит перейти к разработке основанного на измерении проводимости пламени способа диагностики сгорания в ДВС и энергетических установках.

1 Анализ уровня техники и известных исследований

Вопросы диагностики горения, как процесса, являющегося собственно единственным источником работы тепловых двигателей, чрезвычайно актуальны для современной энергетики и транспорта.

Один из методов исследования горения углеводородов, основан на явлении электропроводности пламени. Зона горения в пламени углеводородных топлив обладает аномально высокой неравновесной концентрацией ионов, обусловленной особенностями цепного механизма химических реакций горения этих топлив [6, 7, 18, 19]. Данное явление может быть использовано для различных инженерных приложений, таких как контроль сгорания в ДВС [9-11], контроль срыва пламени в газотрубинных установках [20], контроль детонационного сгорания [21] и контроль сгорания, интенсифицированное плазмой [22].

Для регистрации ионного тока в пламени применяются ионизационные зонды (ИЗ), представляющие собой изолированные электроды между которыми приложена разность потенциалов. Ток на зонд зависит от многих факторов, таких как размер зонда, напряжение на электродах [23].

Прикладные исследования ионизации пламени в условиях ДВС направлены на получение дополнительных диагностических возможностей. Так, в работе [11] проведено исследование корреляции тока ионизации на свече зажигания и давления в камере сгорания. Выявлено, что имеет место взаимосвязь пиков давления и ионного тока. При этом показано значительное рассеяние с невысоким коэффициентом корреляции около 0,6. Результаты в данной статье представлены таким образом, как если бы ионизационный датчик калибровался по датчику давления как перспективное средство измерения в камере сгорания ДВС. Такая методика формирования корреляционной зависимости представляется некорректной. Ведь при турбулентном горении в замкнутом объеме равные давления в камере сгорания могут быть достигнуты при разных локальных физико-химических условиях во фронте пламени и в

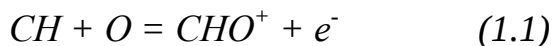
постпламенных газах в районе свечи зажигания. Что и подтверждает низкий коэффициент корреляции значений ионного тока и давления. В данном случае нельзя с уверенностью утверждать, что низкая корреляция обусловлена флуктуациями пламени. Дальнейшие исследования [24], проведенные с применением современных оптических методов (лазерно-индуцированная флуоресценция OH и NO радикалов), показали, что источником рассеяния сигнала в фазе термической ионизации являются флуктуации заряженных частиц OH- и NO+. Кроме того, в данной работе показано значительное влияние следов щелочных металлов на сигнал тока ионизации именно в термической фазе.

В двух вышеописанных работах описаны исследования только части сигнала ионного тока, связанного с термической ионизацией, что снижает ценность полученной информации.

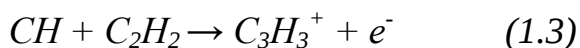
В работе [25] выявлена корреляция ионного тока в камере сгорания ДВС и соотношения топливо/воздух. Предлагаемую взаимосвязь между хемионизацией в зоне горения и составом смеси авторы обосновывали на основе результатов фундаментальных исследований, представленных в [18-19]. Авторы делают вывод, что первичными ионами, определяющими образование остальных ионов являются ионы CHO^+ и C_3H_3^+ . Однако, моделирование ионизации пламени в условиях ДВС с искровым зажиганием на основе уравнений реакций с участием данных ионов не дало адекватного описания экспериментальных данных. Что говорит либо о влиянии дополнительных факторов на ионизацию пламени, либо о неадекватности принятой кинетической модели.

Механизм кинетики горения углеводородов посвящено множество исследований в последнее десятилетие. В том числе исследуются механизмы образования заряженных частиц. Однако при достаточно большом количестве экспериментальных исследований ионизации пламени, не много исследований посвящено теоретическому моделированию ионизации пламени [17-19, 26-30]. Данные работы отличаются тем, что в них исследуется или ионизация метанового пламени или суррогатного топлива (моделирующего горение бензина) в условиях гомогенного воспламенения (HCCI). В первых работах,

посвященных данному вопросу [18-19], основными ионами считались CHO^+ и H_3O^+ (реакции ниже).



Более поздние исследования дополнили эту модель реакцией



Затем механизмы реакций были расширены значительно. При этом характерно, что в разных работах для метановоздушного пламени основными частицами, обуславливающими проводимость пламени, являются разные ионы. Так, например, в теоретической работе [26] рассматривается 214 реакций и основными ионами считаются NO^+ , NO_2^- , NO_3^- , CO_3^- , CO_4^- , OH^- . В тоже время в работе [30] на основе анализа экспериментов в бомбе постоянного объёма предложено 22 реакции с участием 7 заряженных частиц (e^- , CHO^+ , H_3O^+ , NO^+ , OH^- , O_2^- , O^-). В данной работе для расчётов использован подход, основанный на анализе равновесных условий, что не является хорошим приближением для условий ДВС. Однако в этой работе [30] экспериментально показано, что ионизация пламени определяется более значительно составом смеси, нежели начальными условиями сгорания, что является, безусловно, важным фактом, подтверждающим химическую природу ионизации пламени углеводородов.

Отдельного внимания заслуживает работа [17], где на основе экспериментов в двигателе с НСЦИ-процессом показано, что ключевым ионом, определяющим максимум ионного тока при реакциях участием радикала СН является H_3O^+ . Это исследование является наиболее близким к сгоранию в традиционных ДВС с искровым зажиганием, так как сжигалось суррогатное бензину топливо. Однако условия сгорания значительно отличались из-за организации НСЦИ-процесса.

Стоит отметить, что во всех работах ионизированные стадии в основном выявляются в реакциях именно с участием радикала CH , то есть наличие именно углеводородных радикалов необходимо для хемиионизации пламени.

Таким образом, можно сделать вывод, что расчётные методики, адекватно описывающие ионизацию пламени углеводородов в условиях турбулентного горения в замкнутом объёме, отсутствуют в открытых источниках. Следовательно, для развития методик диагностики сгорания с помощью ионизационных зондов необходимы экспериментальные исследования взаимосвязей основных параметров сгорания и ионизации пламени. Основным таким параметром является скорость сгорания.

Вообще совершенство любого устройства, сжигающего углеводородное топливо (в том числе рабочего процесса ДВС), определяется скоростью сгорания [1]. Скорость сгорания в ДВС определяется скоростью химических реакций горения и интенсивностью турбулентного движения заряда в камере сгорания [31-32]. С 1960-х гг. проводятся фундаментальные исследования, направленные на выявление ионизированных стадий механизма сгорания углеводородов и анализ взаимосвязи ионизации пламени со скоростью химических реакций. Так, в работе [33], показана прямая пропорциональность тока ионизации и скорости химических реакций горения. Однако в дальнейшем данный вывод не подтвердился [34] и был исправлен. Взаимосвязь скорости ионизации и скорости химических реакций сгорания метана была показана как степенная функция [35]. В работе [36] также показана нелинейная взаимосвязь ионного тока и скорости распространения пламени. В данной работе предполагается, что в области бедных смесей достигнуты квазистационарные условия образования и рекомбинации заряженных частиц. При этом показан различный характер взаимосвязи для бедной и для богатых смесей. Кроме того, нелинейная взаимосвязь максимального давления в цилиндре ДВС и тока ионизации показана в работе [17]. Как известно, максимальное давление в цилиндре ДВС зависит от скорости сгорания, поэтому данный результат также показывает нелинейность взаимосвязи ионизации пламени и основных параметров сгорания.

Выводы по обзору известных исследований.

1. Тематика ионизации пламени представляет значительный интерес на современном уровне исследований. Основные направления, характерные для ДВС:
 - выявления изменений в характере распространения пламени при горении смесевых топлив (природный газ с водородом, биогазы);
 - исследование реакционных зон в рабочем процессе с гомогенным самовоспламенением (НССИ – процесс);
 - исследования детонационного сгорания;
 - применения в системах управления (от простого выявления пропусков зажигания, до сложной обработки сигнала ионного тока с применением различного мат. аппарата (нейронные сети и т.д.)).
2. Расчётные методики, адекватно описывающие ионизацию пламени углеводородов в условиях турбулентного горения в замкнутом объёме, отсутствуют в открытых источниках.
3. Показано, что в условиях, приближенных к ДВС (бомба постоянного давления), ионизация пламени определяется более значительно составом смеси, нежели начальными условиями сгорания.
4. В метановоздушных смесях, а также в смесях суррогатного топлива в условиях близких к реактору идеального смешения, выявлены основные типы ионов, отвечающих за химическую ионизацию пламени. Данные результаты могут быть использованы для анализа механизмов горения в современных ДВС с искровым зажиганием после предварительных исследований.
5. Влияние следов щелочных металлов оказывает значительное влияние в основном на термическую ионизацию продуктов сгорания.
6. В известных исследованиях показана нелинейная взаимосвязь ионизации пламени и скорости сгорания.

2 Экспериментальная установка и методика исследований

2.1 Экспериментальная установка

Объект исследования – УИТ 85, одноцилиндровая исследовательская установка (рис. 2.1), карбюраторная, с изменяемой степенью сжатия, обороты поддерживаются постоянными 600 и 900 об/мин.

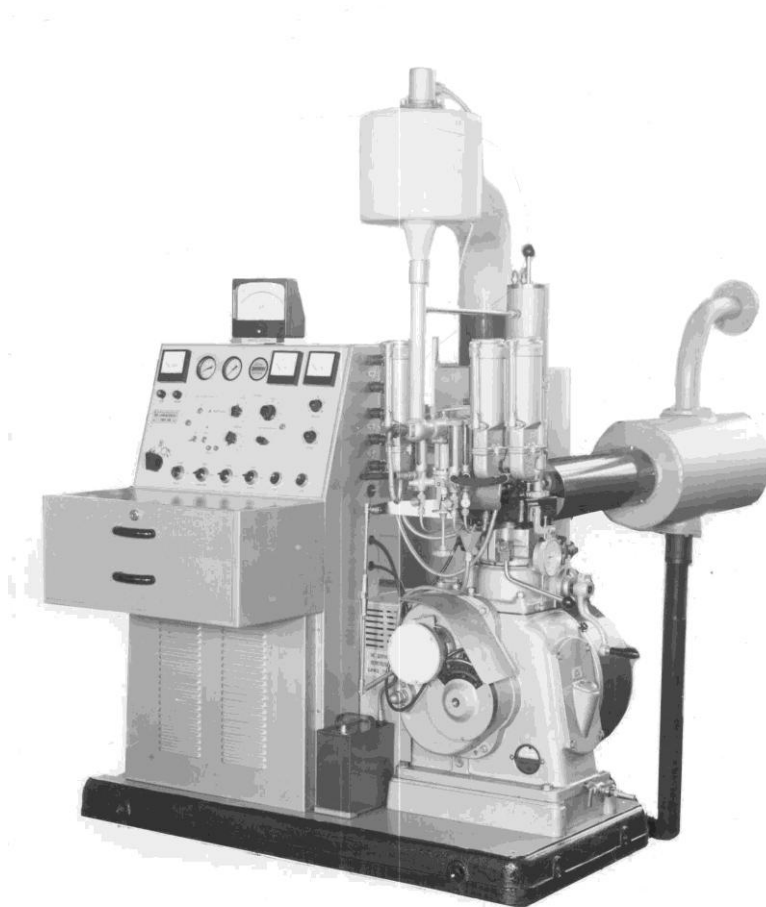
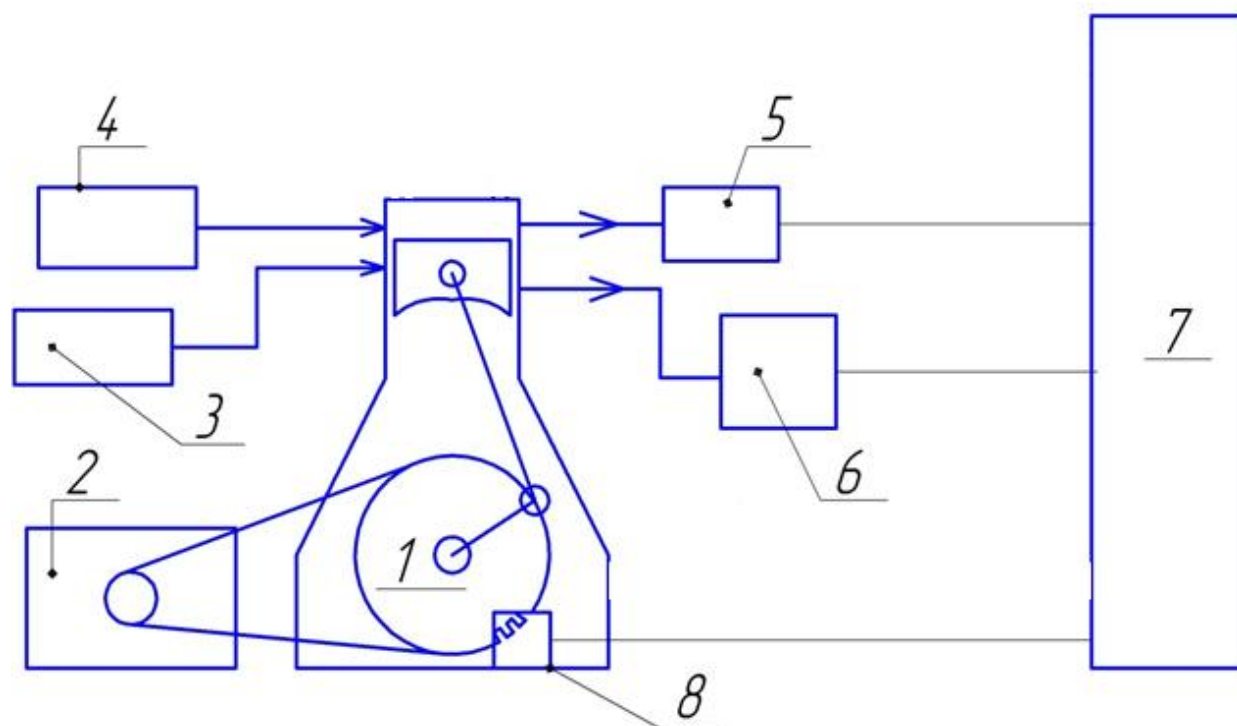


Рисунок 2.1 – внешний вид установки УИТ-85

Коленчатый вал приводится во вращение электродвигателем, поэтому обороты всегда стабильны. Данное свойство весьма важно для исследовательских целей, т.к. при постоянной угловой скорости постоянны инерционные нагрузки на детали. Поршневая группа может долго работать в условиях детонации. В

основном, при горении всегда есть какая-то избыточная мощность на валу двигателя, и электропривод играет роль тормоза, стабилизирующего обороты. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.2.



1. Картер установки УИТ-85
2. Электропривод
3. Система измерения массового расхода топлива
4. Система измерения массового расхода воздуха
5. Система измерения давления в камере сгорания
6. Система возбуждения и мониторинга ионного тока
7. Система сбора данных

Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки

Средства измерения, используемые при проведении эксперимента.

1. **Ионизационный зонд.** Изолированный от корпуса установки проводник с постоянным положительным потенциалом порядка 300 В. При соприкосновении с фронтом пламени регистрируется ток в цепи зонда, обусловленный электропроводностью пламени углеводородов. Позволяет

фиксировать момент прихода пламени к данной точке, и, соответственно, геометрическую скорость распространения пламени.

2. **Датчик давления** Kistler 6117BFD17 (Швейцария). Пьезоэлектрический, специально приспособленный для исследований ДВС, совмещенный со свечей зажигания в одном корпусе. Неохлаждаемый, термостабильный, собственная частота 200 кГц.
3. **Датчик поворота коленчатого вала HW H0a0963** оптический (дискретность 3 градуса поворота коленчатого вала), погрешность менее 1°ПКВ.
4. **Датчик искрового разряда** индуктивный.
5. **Датчик массового расхода воздуха (ДМРВ)** термоанемометрический (Bosch). Специально откалиброван для данной установки. Погрешность измерения массового расхода воздуха не более 5%.
6. **Датчик кислорода** в отработавших газах (λ -зонд) Bosch.
7. **Весы лабораторные В-512** (погрешность 0,1 грамм) для определения массового расхода топлива.

В камеру сгорания, имеющей цилиндрическую форму, диаметрально противоположно свече зажигания на расстоянии 75 мм от центрального электрода свечи зажигания, установлен ионизационный зонд (6). Появление импульса тока на ионизационном зонде соответствует появлению пламени в зоне установки зонда. Схема установки ионизационного зонда в камеру сгорания показана на рис. 2.3

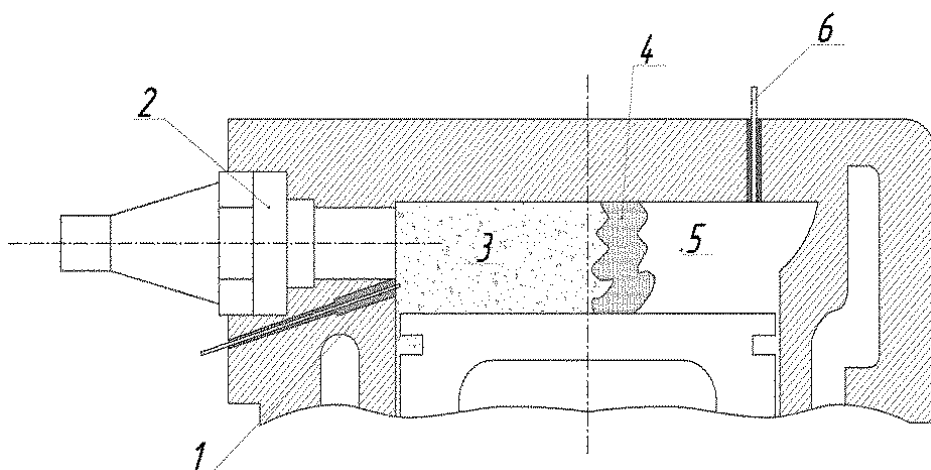


Рисунок 2.3 – Схема камеры сгорания.

1 – датчик давления Kistler, 2 – свеча зажигания, 3 – продукты сгорания, 4 – фронт пламени, 5 - свежая смесь, 6 - ионизационный зонд.

2.2 Методика проведения эксперимента

Методика проведения экспериментов заключается в одновременной регистрации сигналов ионизационного зонда и сигналов других средств измерения, позволяющих идентифицировать состояние объекта исследования. Данные регистрировались с помощью системы сбора данных на базе 12 битного АЦП Advantech с дискретизацией 100000 точек/сек на каждый канал. В ходе эксперимента на каждом режиме проводилась одновременная регистрация давления и электрической проводимости пламени в камере сгорания, а также положения коленчатого вала и момента искры.

Регистрация на одном режиме включала не менее 200 циклов для получения достаточно достоверных средних значений. Рассеяние результатов обусловлено межцикловой нестабильностью из-за флуктуаций пламени, что характерно для турбулентного горения.

Пример регистрации осциллограмм при горении показан на рис. 2.4. Сигнал ионного тока оценивался двумя параметрами:

- временем между искровым разрядом и максимумом сигнала.
- амплитудой первого пика сигнала.

Из рис. 2.4 видно, что первый пик сигнала на ионизационном зонде падает практически до нуля после достижения максимального давления, несмотря на высокую температуру в камере сгорания. Этот факт говорит о том, что в эксперименте регистрировалась и оценивалась ионизация, обусловленная именно химическими особенностями горения углеводородов. По амплитуде сигнала оценивалась электрическая проводимость пламени.

Варьируемые факторы – коэффициент избытка воздуха и добавка водорода в топливо-воздушную смесь (ТВС) в количествах 3 и 5% массы смеси топлив. Эти факторы позволяют менять скорость реакций горения и динамику процесса сгорания в ДВС. В работе использовались два скоростных режима: 600 и 900 об/мин. Угол зажигания составлял 16 град. до ВМТ и поддерживался постоянным.

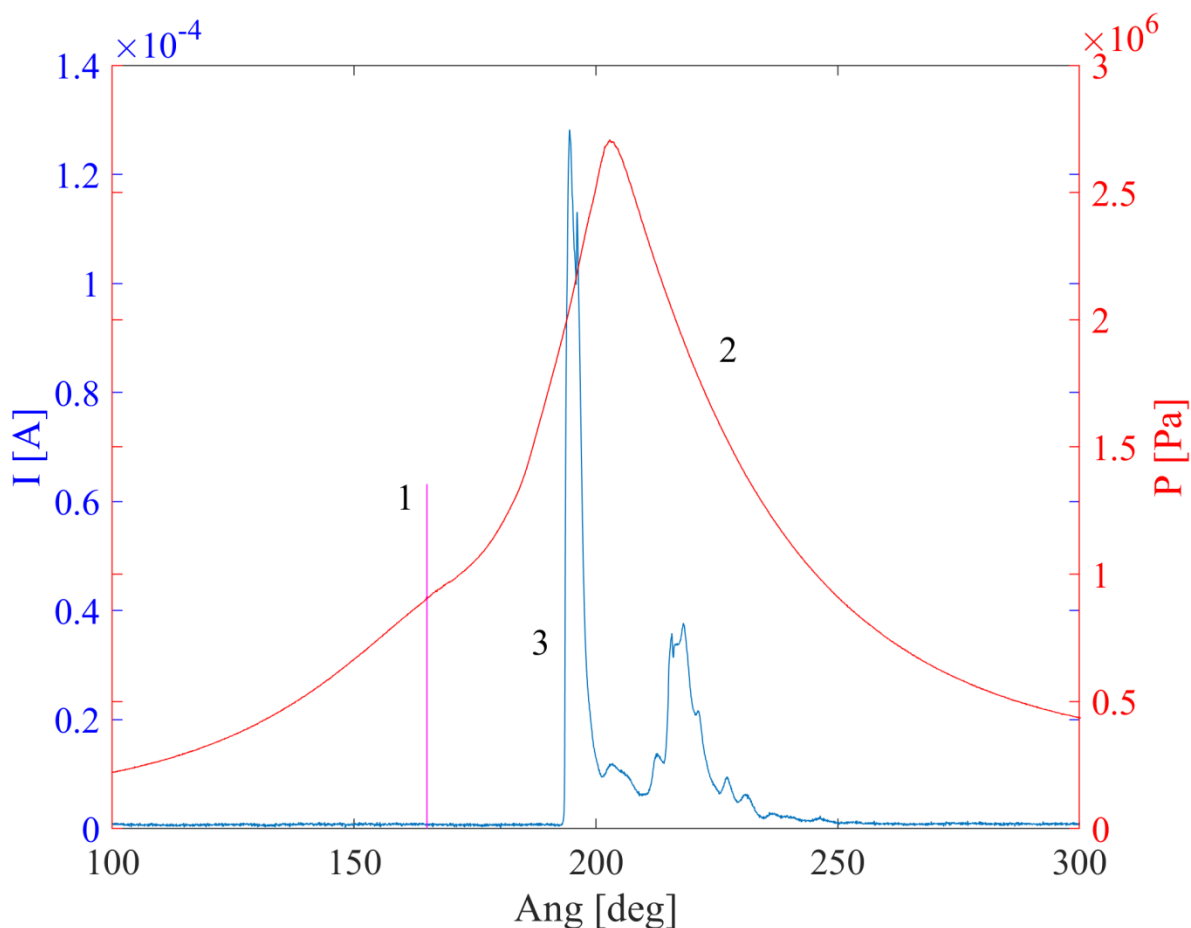


Рисунок 2.4 – Пример регистрируемых сигналов.

1 – отметка искры, 2 – сигнал давления, 3 – сигнал ионизационного зонда.

2.3 Методика обработки сигналов ионного тока

По амплитуде сигнала оценивалась электрическая проводимость пламени. Для этого ток через ионизационный промежуток зонда измерялся с помощью АЦП, подключенного через датчик тока LEM LV25-P для обеспечения гальванической изоляции.

Измерительная схема представляет собой два контура:

1. Последовательно включенные источник питания (U_{bat}), зонд (U_{zond}), резистор (R_{pr}), датчик I_{em} (R_{lem})
2. Параллельно включенные датчик I_{em} , резистор (R_{sec}), АЦП ($U_{zondSec}$)

Источник питания в первичном контуре обеспечивает разность потенциалов между электродами зонда. При появлении между электродами заряженных частиц, в цепи появляется ток. Резистор R_{pr} , служит для ограничения тока через зонд.

Ток в первичном контуре (I_{pr}) передаётся во вторичный контур (I_{sec}) с коэффициентом передачи K_n .

$$I_{sec} = I_{pr} \cdot K_n$$
$$K_n = \frac{2500}{1000} = 2.5$$

Ток во вторичной цепи, создаёт на резисторе R_{sec} разность потенциалов ($U_{zondSec}$), которая измеряется с помощью АЦП.

Рассчитав ток и напряжение в первичной цепи:

$$I_{zondPr} = \frac{U_{zondSec}}{R_{sec} \cdot K_n}$$

$$U_{zondPr} = U_{bat} - I_{zondPr} \cdot R_{pr} - I_{zondPr} \cdot R_{lem}$$

можно оценить проводимость зонда (пламени):

$$\sigma = \frac{I_{zondPr}}{U_{zondPr}}$$

2.4 Методика обработки индикаторных диаграмм

За меру скорости сгорания принята скорость тепловыделения в момент регистрации ионного тока. Скорость тепловыделения определялась по изменению в камере сгорания давления в ходе процесса. Для оценки тепловыделения использовалась однозонная модель сгорания (давление и температура на каждом шаге расчета приняты одинаковыми по всему объему КС) [37]. Для оценки тепловыделения использовались первое начало термодинамики и уравнение состояния идеального газа.

$$H_u \cdot dm_f = \nu \cdot C_v \cdot dT + p \cdot dV + dQ_w \quad (2.1)$$

$$p \cdot dV + V \cdot dp = \nu \cdot R \cdot dT + d\nu \cdot R \cdot T \quad (2.2)$$

где

H_u – теплотворная способность топлива,

dm_f – масса сгоревшего на шаге расчета топлива,

ν – количество вещества в камере сгорания к данному шагу расчета,

C_v – мольная теплоемкость (при постоянном объеме) рабочего тела на данном шаге расчета,

dT – изменение средней температуры в КС на данном шаге расчета,

p – давление в камере сгорания на данном шаге расчета,

dV – изменение объема КС за время данного шага расчета,

dQ_w – количество теплоты, переданное в стенки на данном шаге расчета,

V – объем КС на данном шаге расчета,

dp – изменение давления в КС за время данного шага расчета,

R – универсальная газовая постоянная,

$d\nu$ – изменение количества вещества в КС на данном шаге расчета,

T – средняя температура в КС на данном шаге расчета.

Величина dv рассчитывается для каждого компонента смеси отдельно:

$$dv_i = dm_f \cdot M_i$$

M_i [кмоль/кг] – рассчитанное с учётом избытка/недостатка воздуха, количество i -го компонента смеси (кислород, вода, углекислый газ, оксид углерода, водород), образующегося / расходующегося при сжигании 1 килограмма топлива.

Теплоотдача в стенки определялась по уравнению Ньютона:

$$dQ_w = T - T_w \cdot \alpha \cdot A \cdot dt$$

где

T_w – средняя температура стенок КС (принята равной 450 °С)

α – коэффициент теплоотдачи,

A – площадь поверхности камеры сгорания на данном шаге расчета,

dt – промежуток времени, соответствующий шагу расчета.

Коэффициент теплоотдачи определялся по Вошни [37]:

$$\alpha = 127.93 \cdot D^{-0.2} \cdot p^{0.8} \cdot w^{0.8} \cdot T^{-0.53} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

где

D – диаметр цилиндра.

Характеристическая скорость w определялась как:

$$w = C_1 \cdot c_m + C_2 \cdot \frac{V_d \cdot T_1}{p_1 \cdot V_1} \cdot p - p_0$$

где

c_m – средняя скорость поршня,

V_d – рабочий объем цилиндра,

T_1 и p_1 – температура и давление на впуске,

V_1 – объем цилиндра в начале сжатия,

и p_0 – текущее давление в цикле без горения,

коэффициент C_1 определялся по [37] как

$$C_1 = 2,28 + 0,308 \cdot \frac{c_c}{c_m}$$

где

c_c – скорость вращения потока на впуске.

По [37] соотношение скоростей $\frac{c_c}{c_m}$ или т.н. «intake swirl» принято равным 1, а

C_2 принято равным $3,21 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{К}}$

Система уравнений (1) и (2) содержит 2 неизвестных: dm_f и dT , следовательно, может быть решена. В результате решения получены значения скорости тепловыделения в момент регистрации максимума сигнала на ионизационном зонде (как «мгновенной» скорости сгорания) и средней скорости тепловыделения в процессе. Пример индикаторной диаграммы и расчетных кривых температуры и тепловыделения показан на рис. 2.5. Средняя скорость тепловыделения определялась как интеграл скорости тепловыделения, отнесённый к длительности процесса активного тепловыделения (от момента t_1 до момента t_2 (рис. 2.6)).

Кроме скорости тепловыделения по индикаторной диаграмме определялась работа цикла. На рис. 2.7 показана индикаторная диаграмма в координатах PV , по которой согласно [38] работа цикла определялась как интеграл:

$$L = \int p dV,$$

где p – текущее давление;

dV – малое изменение объёма камеры сгорания на каждом шаге расчёта.

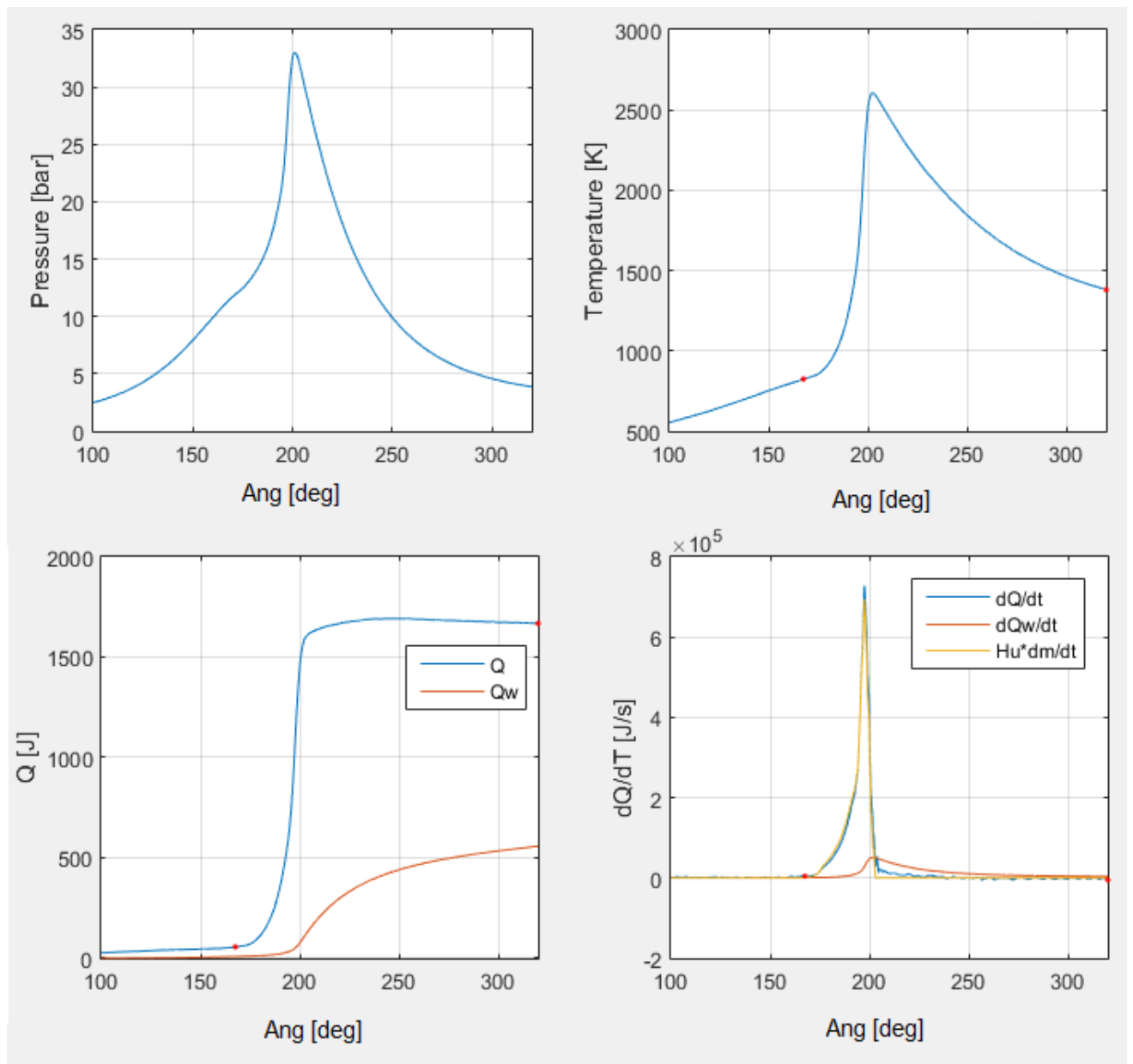


Рисунок 2.5 – Индикаторная диаграмма и рассчитываемые по ней температура и тепловыделение.

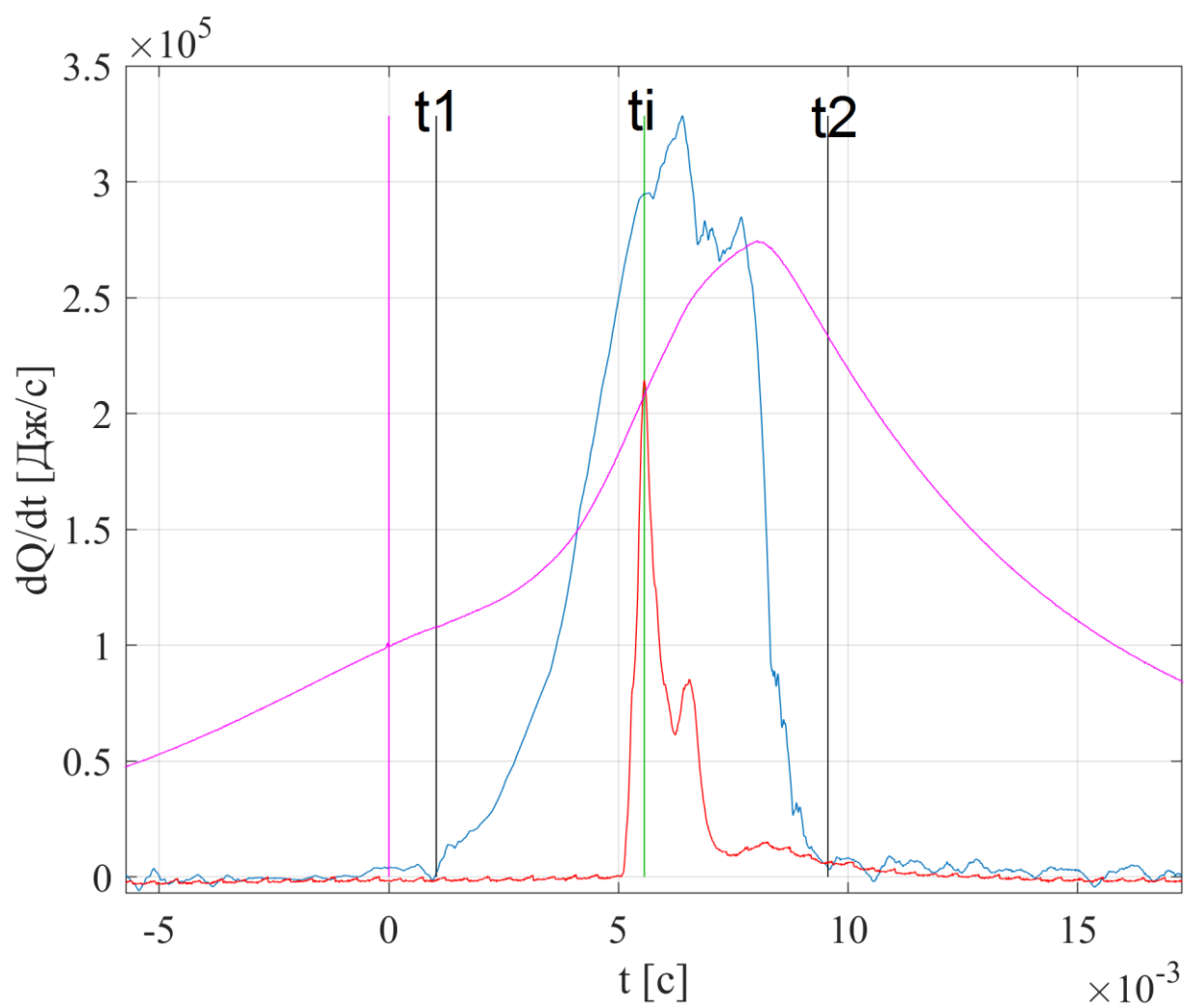


Рисунок 2.6 – К определению скоростей тепловыделения: 0 – момент искрового разряда, t_1 , t_2 – моменты начала и конца тепловыделения, t_i – момент максимума сигнала на ионизационном зонде.

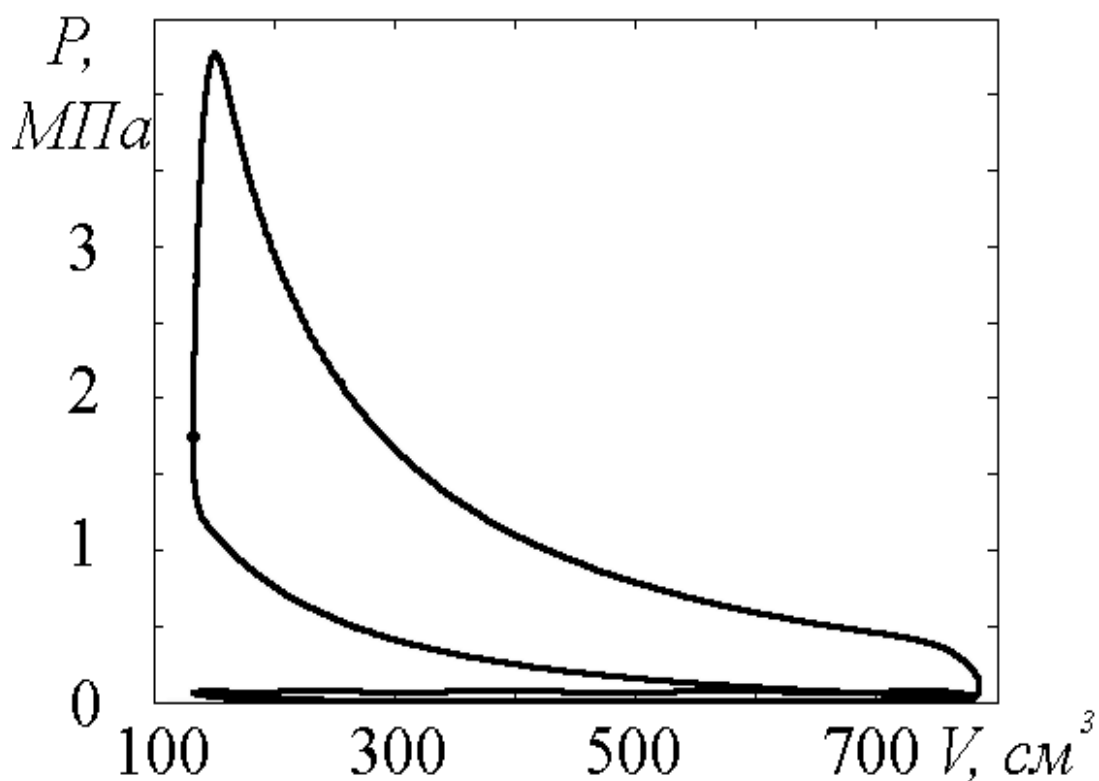


Рисунок 2.7 – Индикаторная диаграмма в координатах PV

Кроме скорости тепловыделения, благодаря тому, что ионизационный зонд был установлен в наиболее удаленной от свечи зажигания зоне, оценивалась средняя скорость распространения пламени:

$$U = \frac{L}{\tau} \quad (3)$$

где L – расстояние от центрального электрода свечи зажигания до ионизационного зонда, τ – время от искрового разряда до возникновения сигнала на ионизационном зонде.

С целью проверки адекватности измеренных данных, для каждого режима работы экспериментальной установки производилась визуальная и численная оценка измерений. Для визуальной оценки строились графики параметров от времени и гистограммы их распределения (рис. 2.8). В качестве численной оценки использовался статистический тест Харке - Бера на нормальность

распределения параметров. Для большинства режимов характерно нормальное распределение цикловых значений.

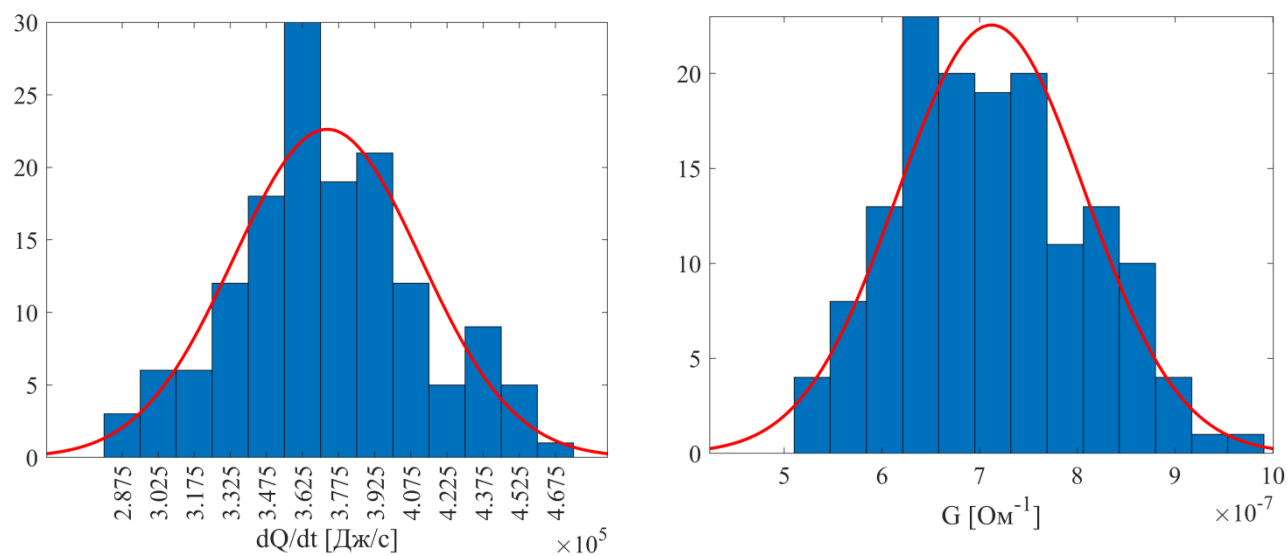


Рисунок 2.8 – Пример гистограмм распределения значений скорости тепловыделения и проводимости пламени

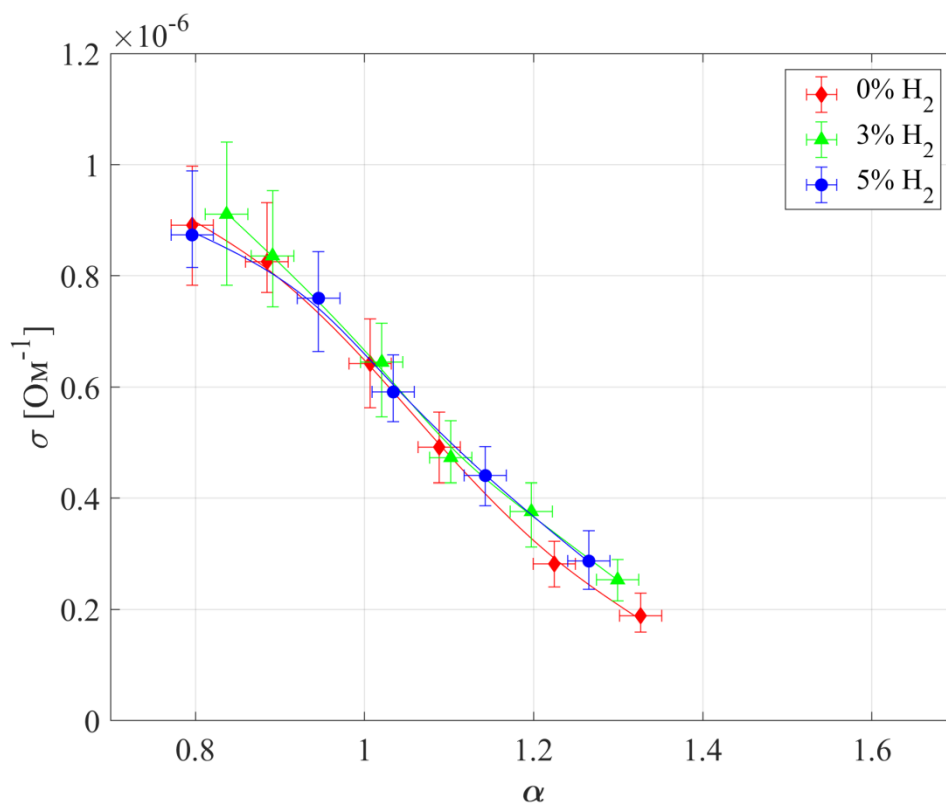
3 Результаты эксперимента

3.1 Зависимости ионизации и скорости распространения пламени от состава смеси

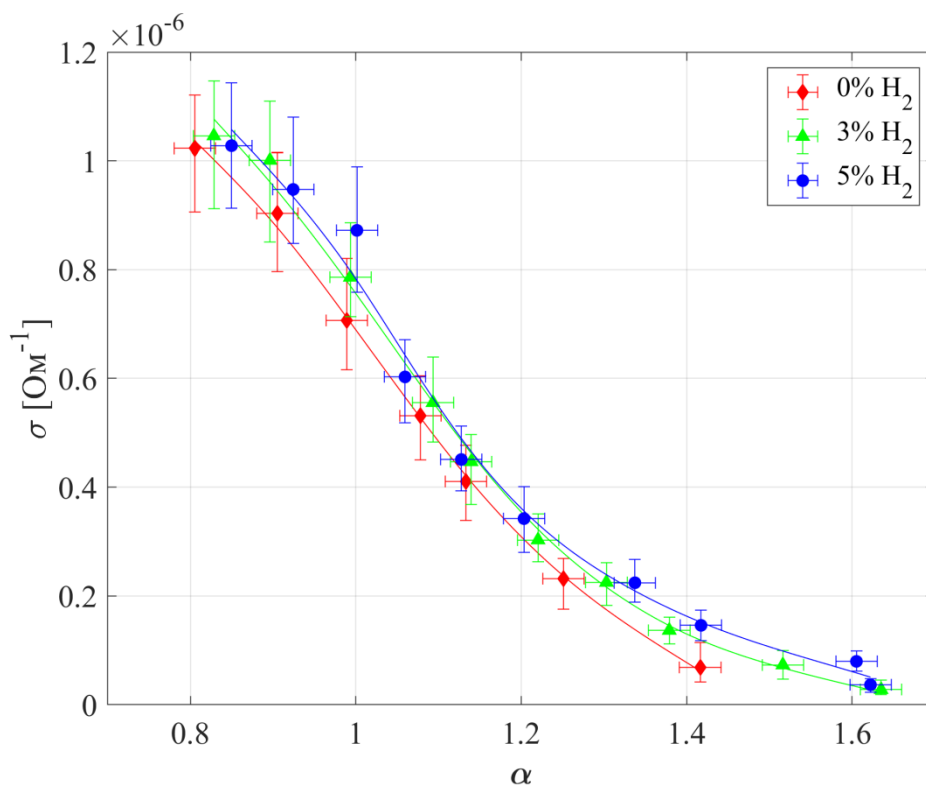
На рис. 3.1 приведены зависимости проводимости пламени от состава смеси для исходной топливоздушной смеси и для смесей с добавкой водорода. Видно, что добавка водорода не приводит к изменению проводимости пламени (изменяется в пределах межцикловой неустойчивости). Увеличение скорости вращения коленчатого вала установки с 600 до 900 мин⁻¹ приводит к незначительному увеличению проводимости пламени в области стехиометрической и обогащенной смесей.

На рис. 3.2 аналогично рис. 3.1 приведены зависимости средней скорости распространения пламени от состава смеси. Показано увеличение скорости распространения пламени при увеличении скоростного режима и при добавке водорода. Причём добавка 5% водорода повышает скорость распространения пламени примерно также как и увеличение скоростного режима – около 15%. Также наблюдается расширение концентрационных пределов обеднённого сгорания при 900 мин⁻¹.

Характер зависимостей проводимости и скорости распространения пламени от состава смеси аналогичен представленным в известных исследованиях [25, 35, 36].

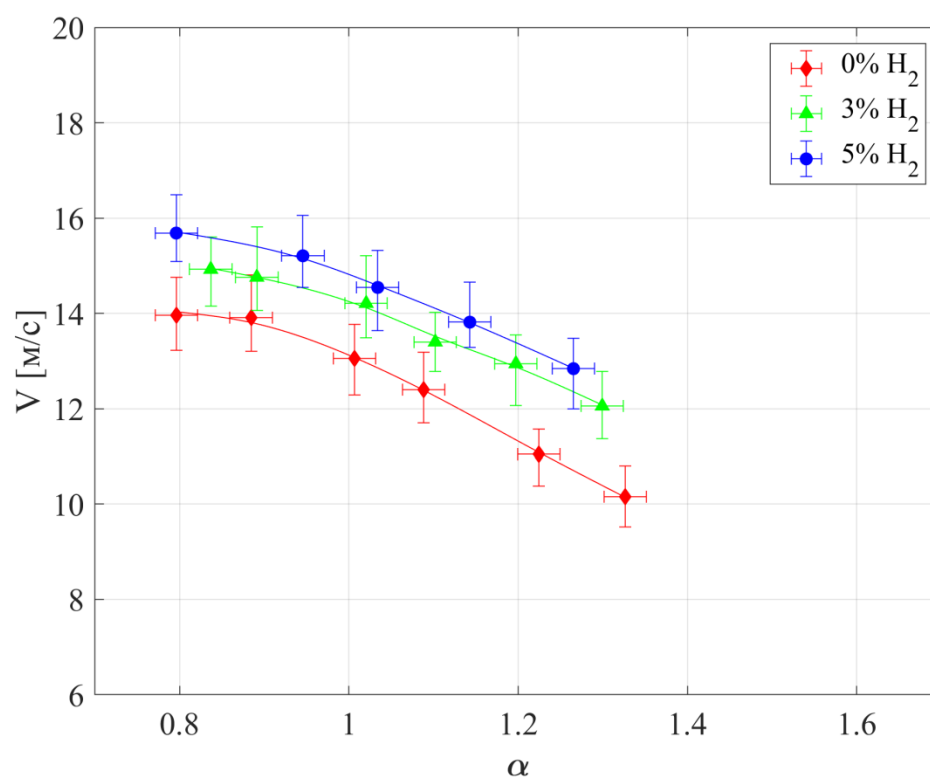


а

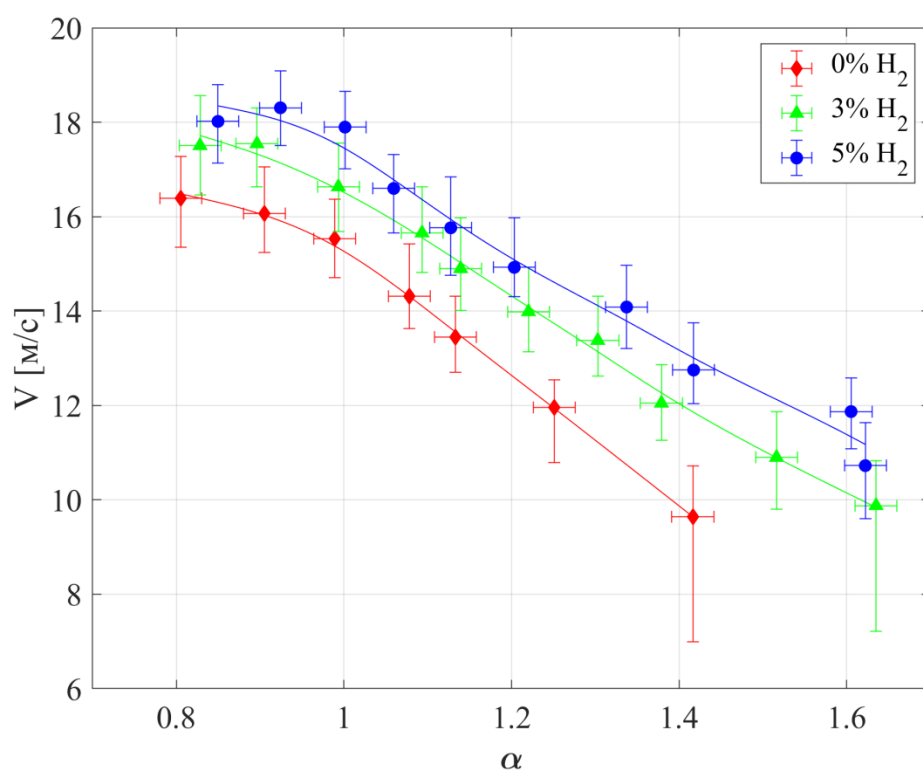


б

Рисунок 3.1 – Зависимость проводимости пламени от состава смеси для различных добавок водорода и двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин⁻¹).



а



б

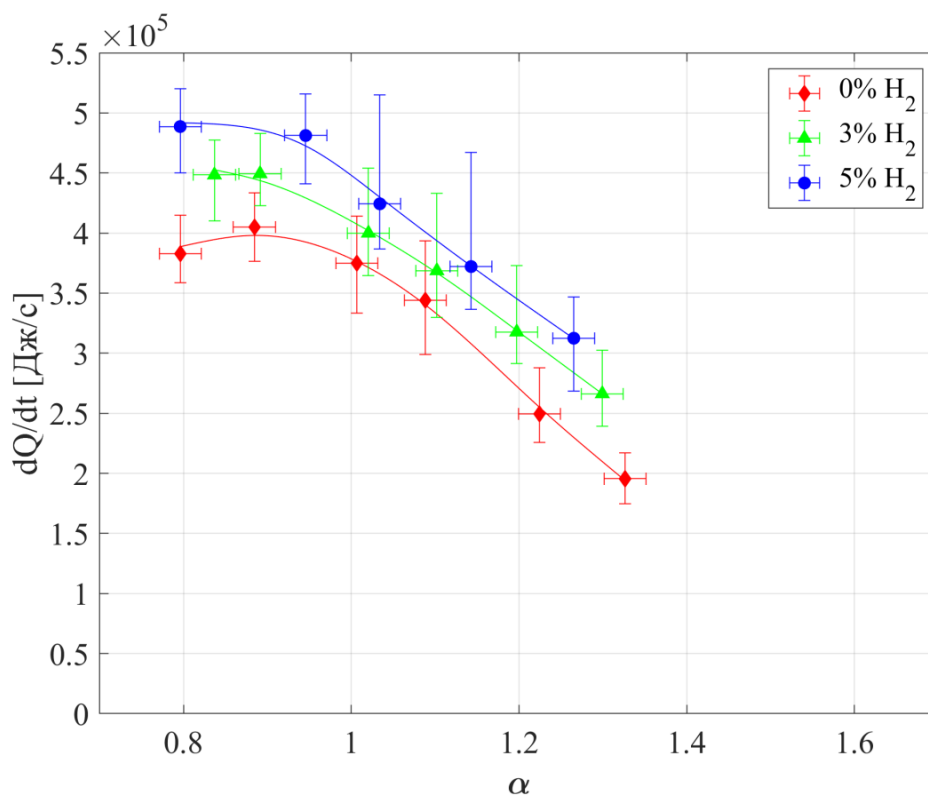
Рисунок 3.2 – Зависимость средней скорости распространения пламени от состава смеси для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин⁻¹).

3.2 Зависимости скорости тепловыделения и работы цикла от состава смеси

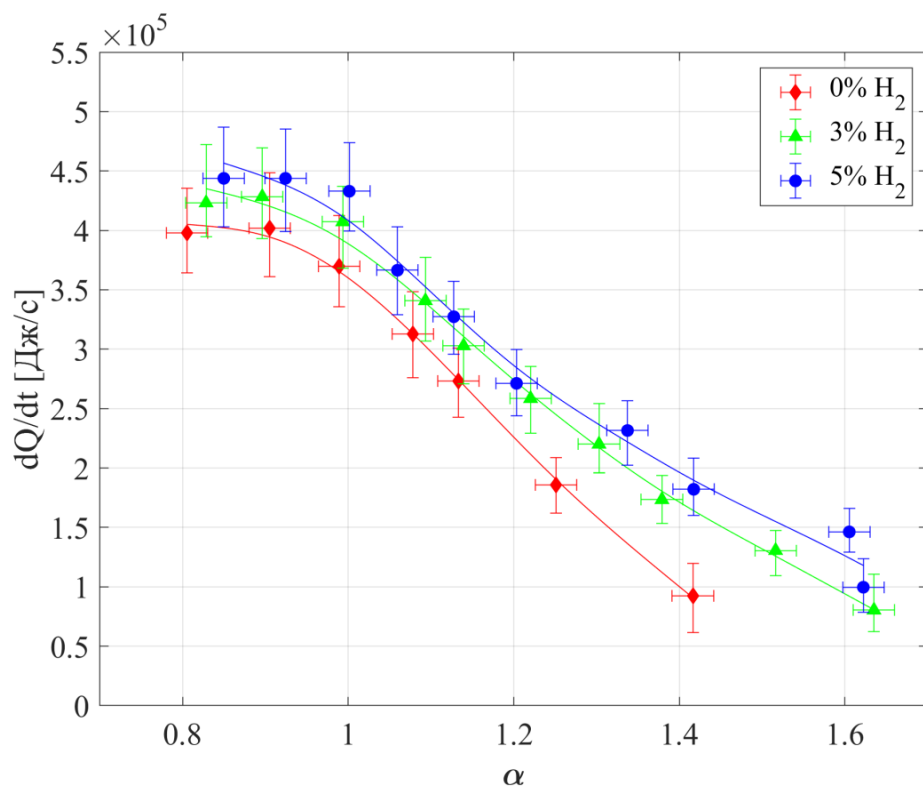
В результате расчёта по уравнениям, приведённым в п. 2.4, построены диаграммы тепловыделения (пример на рис. 2.5) и определены значения скорости тепловыделения в момент регистрации ионного тока, средней за цикл скорости тепловыделения и работы цикла. На рис. 3.3 – 3.4 приведены зависимости скорости тепловыделения в момент регистрации ионного тока и средней скорости тепловыделения за цикл от состава смеси для различных добавок водорода и двух скоростных режимов. Видно, что скорость тепловыделения возрастает аналогично скорости распространения пламени при добавке водорода (особенно это заметно при работе на 900 мин^{-1} на бедных смесях). При изменении скоростного режима скорость тепловыделения практически не изменяется, хотя при этом средняя скорость распространения пламени растёт. То есть при увеличении частоты вращения геометрическая скорость распространения пламени увеличивается, но массовая скорость сгорания при этом не изменяется. Это является следствием того, что угол зажигания при переходе на 900 мин^{-1} не изменяется, что приводит к снижению давления и температур в камере сгорания из-за увеличившейся скорости поршня.

Работа цикла (рис. 3.5) незначительно (5-10%) убывает при добавке водорода в ТВС. Это немногим больше погрешности измерений, но тенденция хорошо прослеживается. Особенно это заметно для работы на 600 мин^{-1} и для бедных смесей на 900 мин^{-1} .

Вообще прямой сравнение зависимостей, полученных в данном эксперименте при 600 и 900 мин^{-1} некорректно, так как в момент сигнала ионизационного зонда при одинаковых составах смеси и топливных композициях в камере сгорания разные условия (разные температура и давление). Поэтому анализ проводится отдельно, а изменение оборотов даёт возможность дополнительного анализа взаимосвязей проводимости пламени и со скоростью сгорания при разных условиях в камере сгорания.

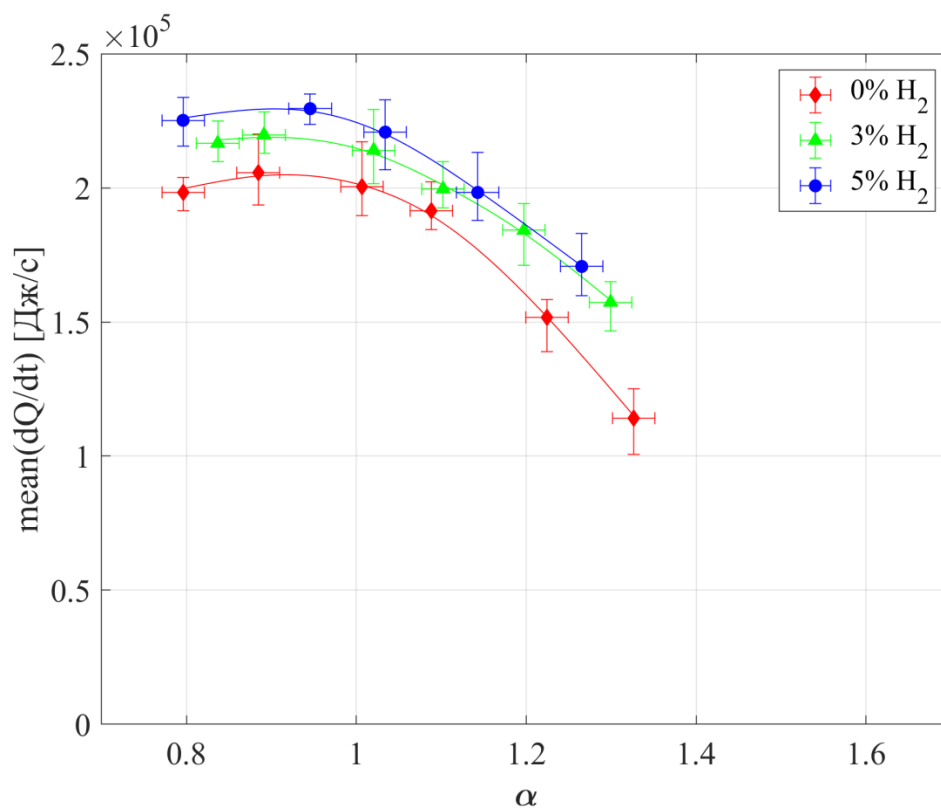


а

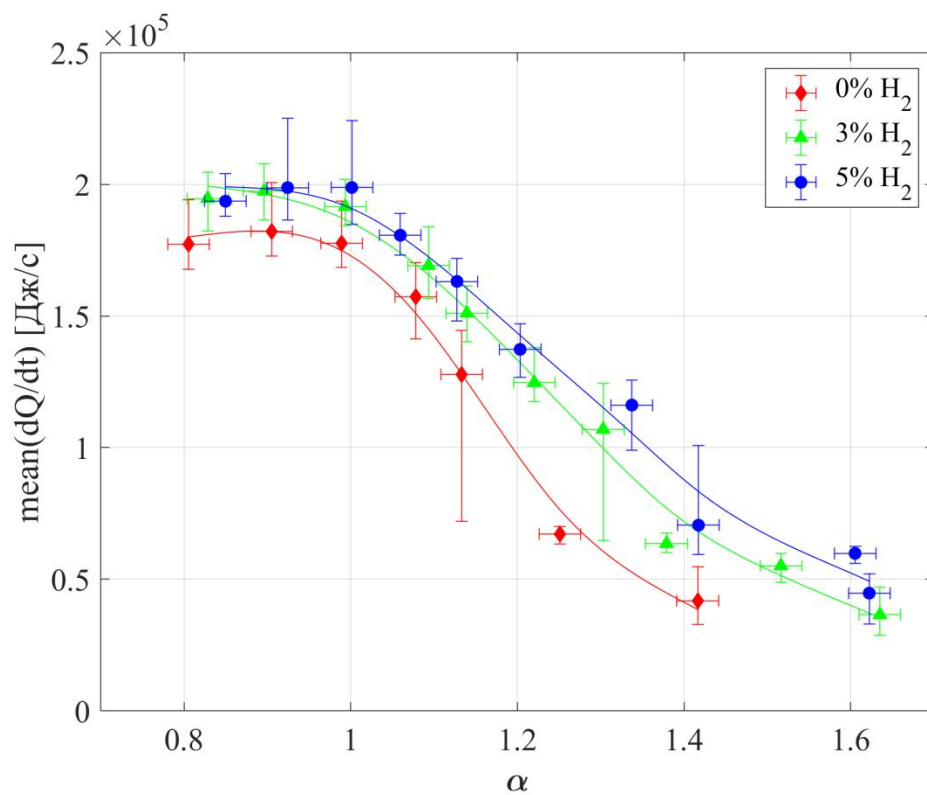


б

Рисунок 3.3 – Зависимость скорости тепловыделения в момент ионного тока от состава смеси для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин⁻¹).

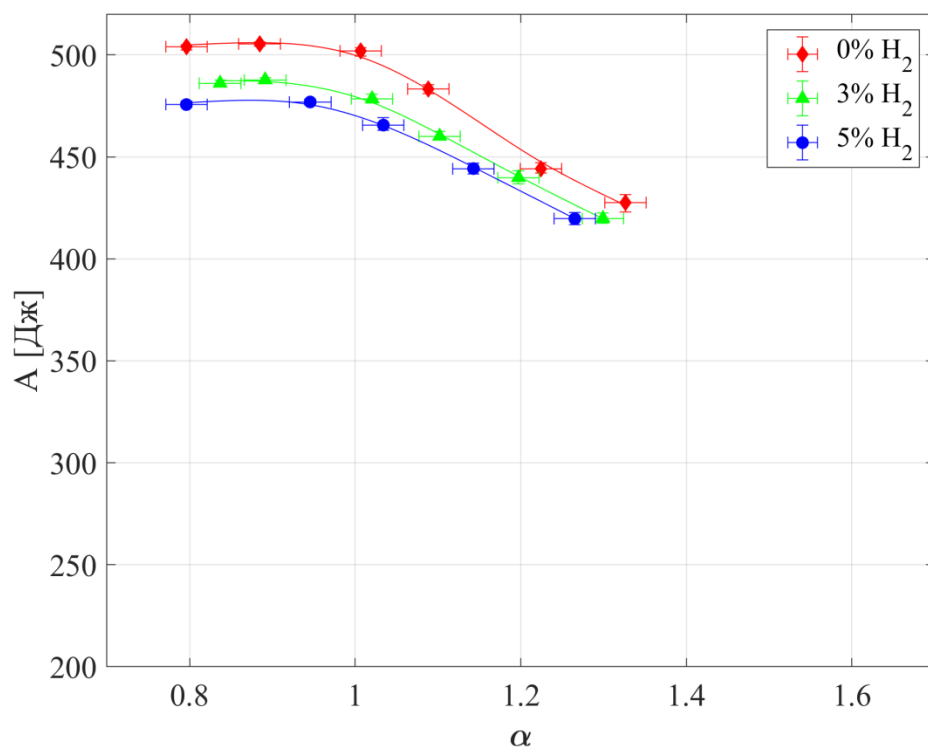


а

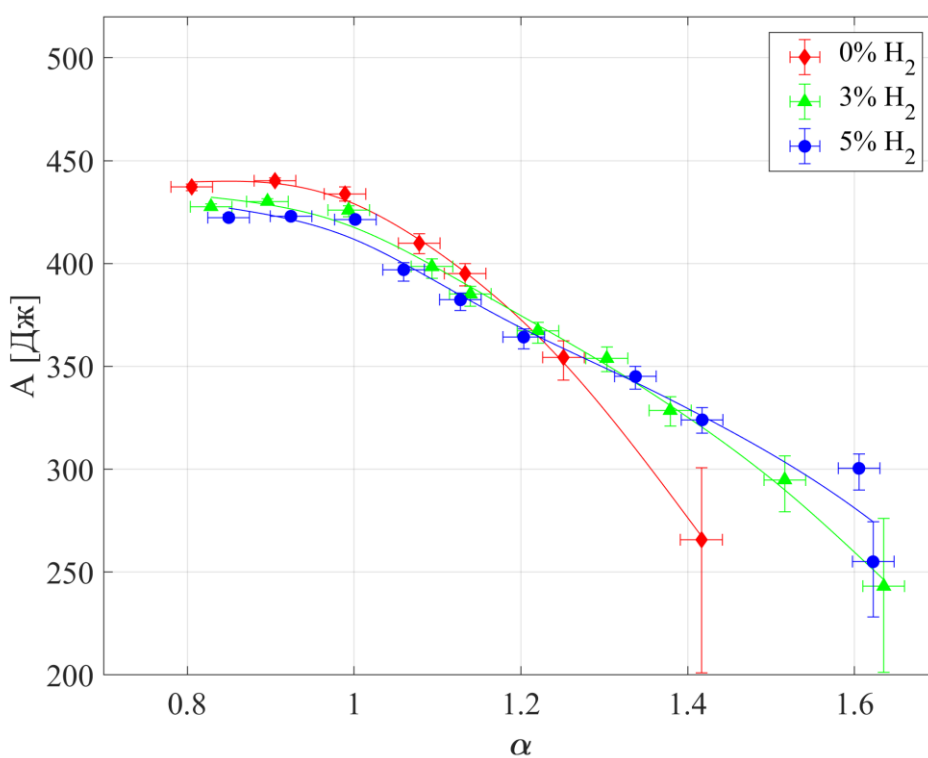


б

Рисунок 3.4 – Зависимость средней скорости тепловыделения от состава смеси для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин^{-1}).



а



б

Рисунок 3.5 – Зависимость работы цикла от состава смеси для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин⁻¹).

3.3 Взаимосвязь проводимости пламени со скоростью сгорания и работой цикла

Согласно цели и задачам работы (для проверки гипотезы работы о том, что проводимость пламени может служить информационным параметром, достаточно просто и адекватно отражающим скорость сгорания) выявлены взаимосвязи проводимости пламени и скорости тепловыделения, как основной меры скорости сгорания. Дополнительно оценены взаимосвязи со средними по циклу параметрами сгорания: средней скорости распространения пламени и работой цикла. На рис. 3.6 – 3.7 в логарифмических координатах показаны взаимосвязи проводимости пламени со скоростью тепловыделения в момент регистрации ионного тока и со средней за цикл скоростью тепловыделения для двух скоростных режимов и с добавками водорода. На рис. 3.8 в логарифмических координатах показана взаимосвязь проводимости и средней скорости распространения пламени в камере сгорания. На рис. 3.9 аналогично представлена взаимосвязь проводимости и работы цикла.

Из рисунков 3.6 – 3.9 видно, что параметры скорости сгорания и работа цикла связаны с проводимостью пламени степенной зависимостью:

$$Y = A \sigma^b \quad (3.1)$$

Где Y – исследуемый параметр цикла (скорость тепловыделения, средняя скорость пламени или работа цикла),

σ – проводимость пламени [Ом^{-1}],

A и b – константы.

Константы данной взаимосвязи сведены в таблицы 3.1 - 3.4.

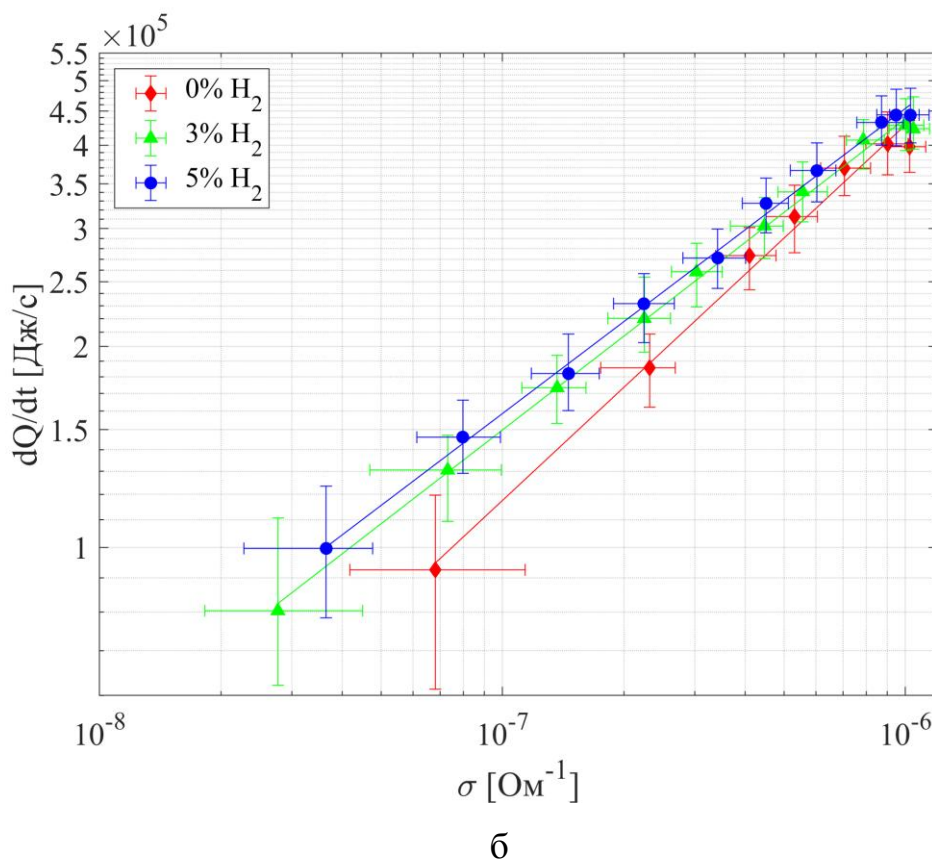
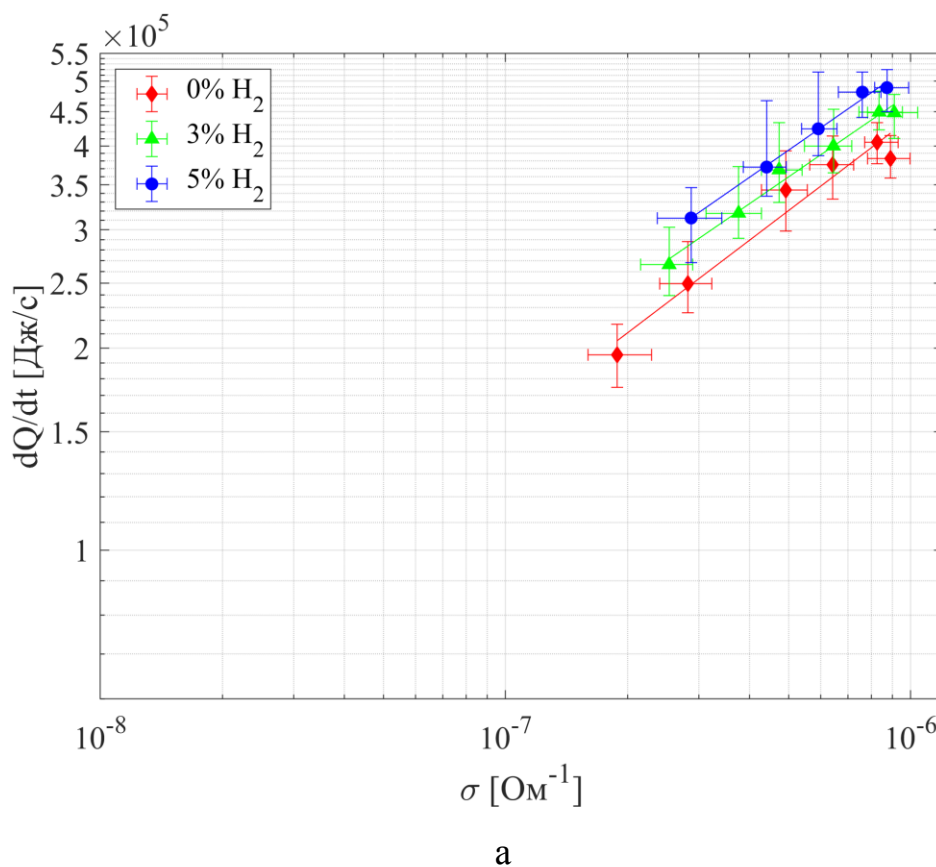
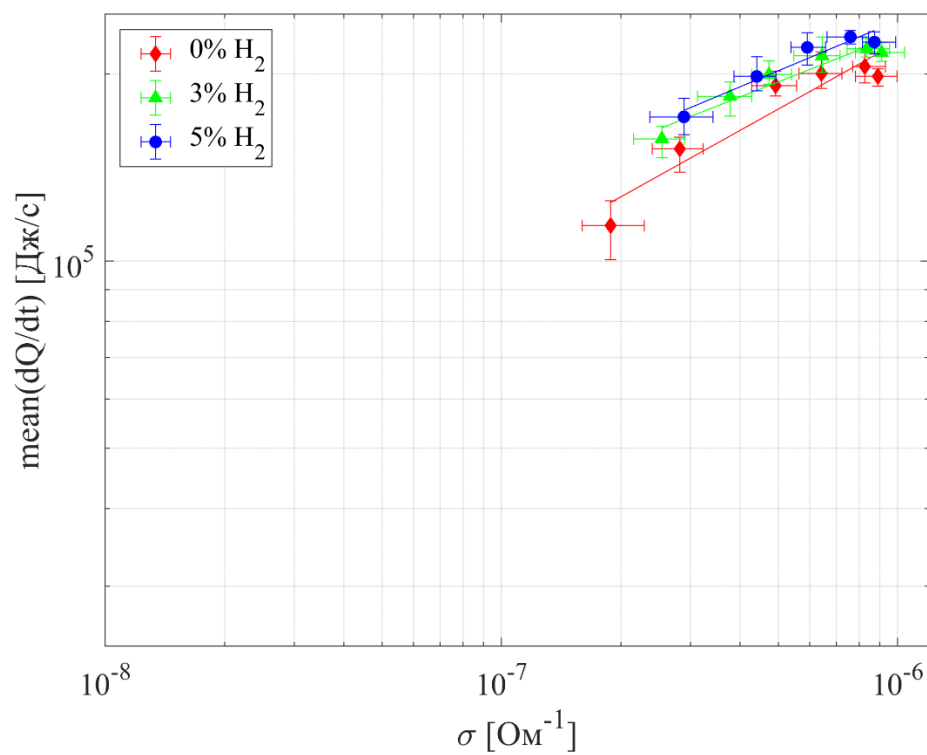
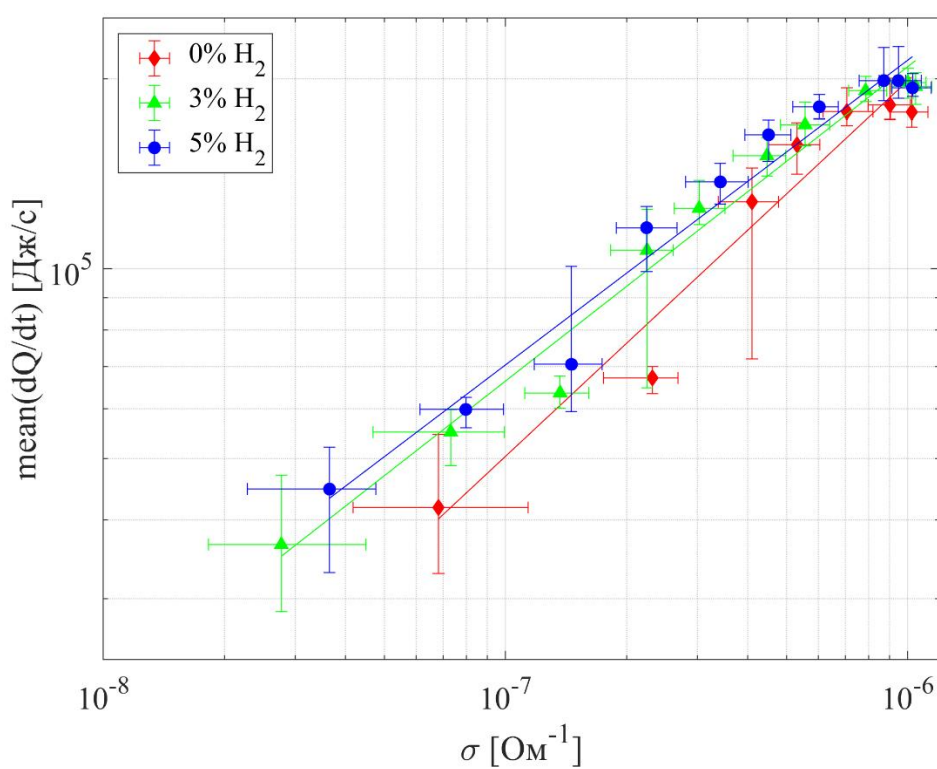


Рисунок 3.6 – Взаимосвязь скорости тепловыделения в момент ионного тока и проводимости пламени для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин^{-1}).



а



б

Рисунок 3.7 – Взаимосвязь средней скорости тепловыделения и проводимости пламени для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин⁻¹).

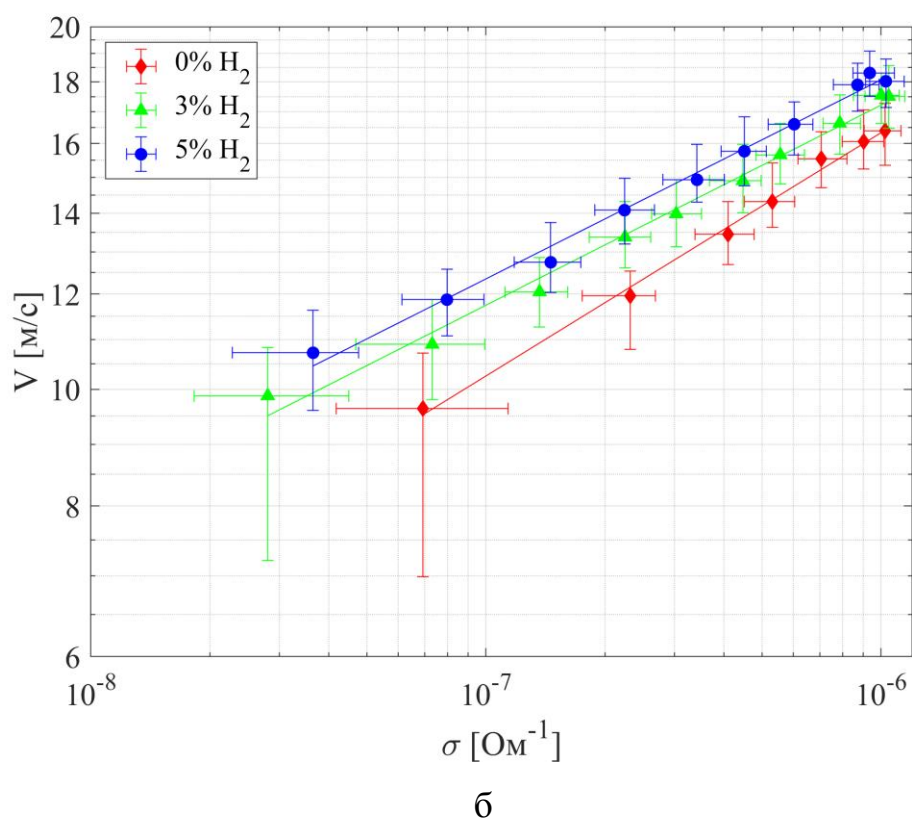
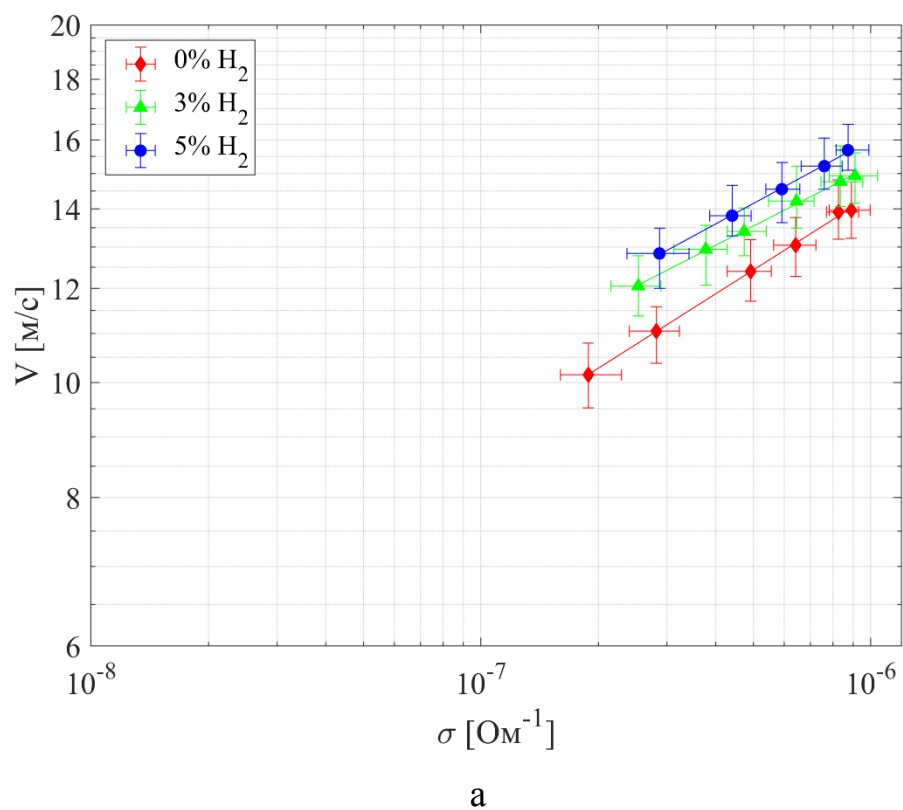


Рисунок 3.8 – Взаимосвязь средней скорости распространения и проводимости пламени для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин⁻¹).

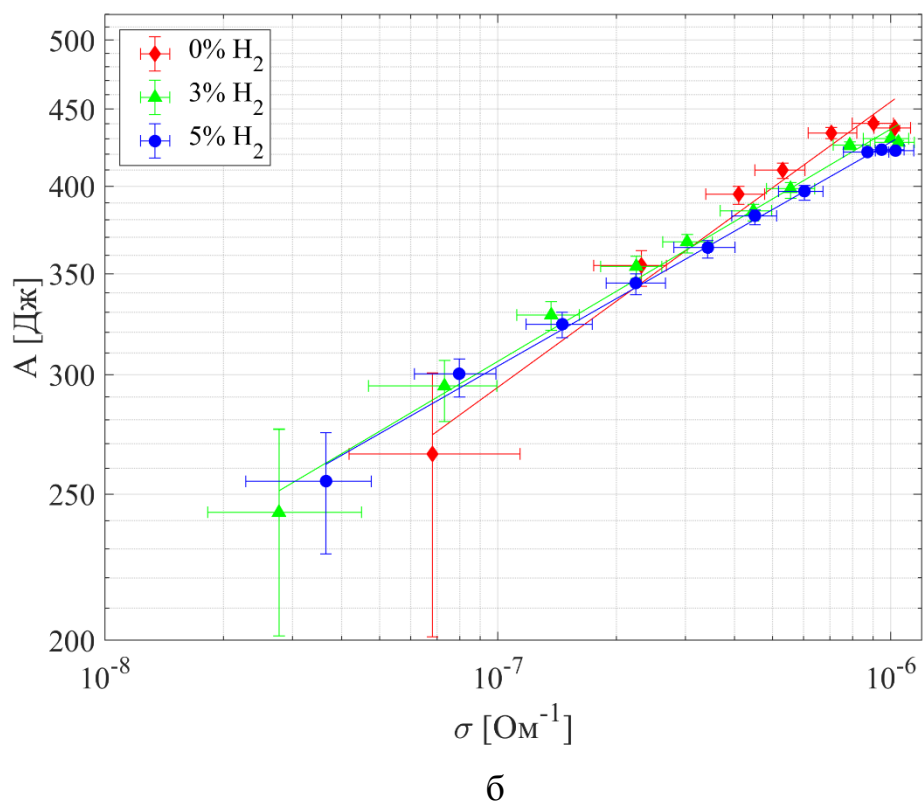
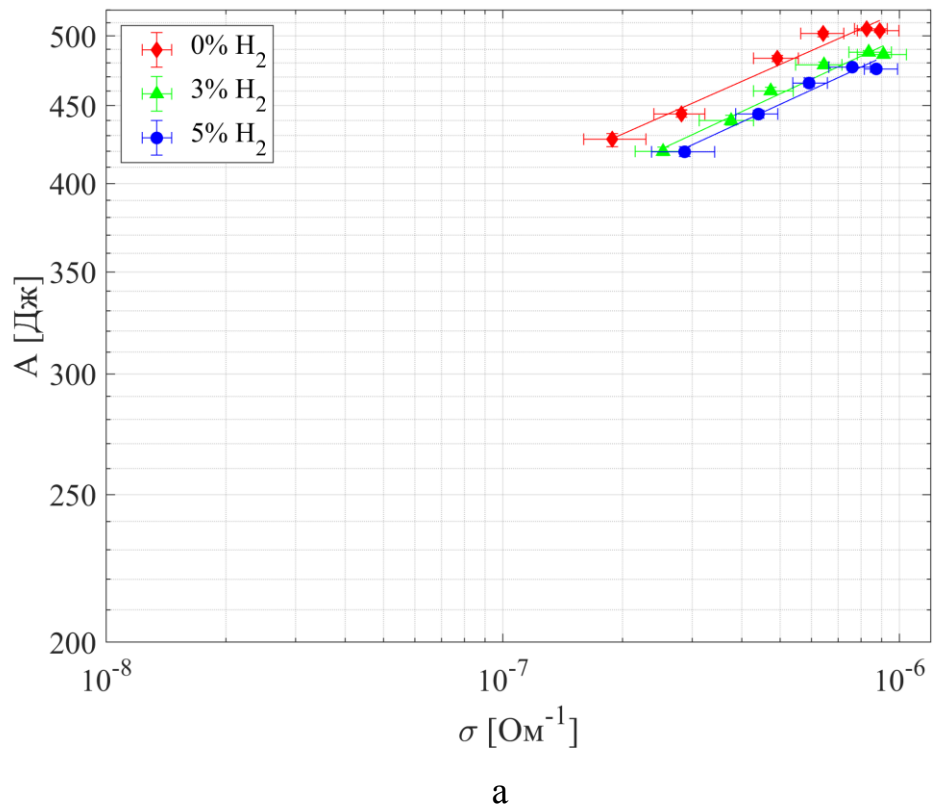


Рисунок 3.9 – Взаимосвязь работы цикла и проводимости пламени для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин⁻¹).

Таблица 3.1 – константы степенной взаимосвязи проводимости пламени σ [Ом⁻¹] и скорости тепловыделения $\frac{dQ}{dt}$ [Дж/с] в момент сигнала ионного тока.

Добавка Н ₂ , %	600 мин-1		900 мин-1	
	А	В	А	В
0	247,9·10 ⁶	0,46	1012,2·10 ⁶	0,56
3	147,4·10 ⁶	0,41	275,0·10 ⁶	0,47
5	173,1·10 ⁶	0,42	249,9·10 ⁶	0,46

Таблица 3.2 – константы степенной взаимосвязи проводимости пламени σ [Ом⁻¹] и средней скорости тепловыделения $\frac{dQ}{dt}$ [Дж/с]

Добавка Н ₂ , %	600 мин-1		900 мин-1	
	А	В	А	В
0	30,5·10 ⁶	0,36	741,7·10 ⁶	0,60
3	7,5·10 ⁶	0,25	204,7·10 ⁶	0,50
5	9,8·10 ⁶	0,27	169,6·10 ⁶	0,48

Таблица 3.3 – константы степенной взаимосвязи проводимости пламени σ [Ом⁻¹] и средней скорости распространения пламени V [м/с]

Добавка Н ₂ , %	600 мин-1		900 мин-1	
	А	В	А	В
0	254,1	0,21	256,7	0,20
3	154,7	0,17	170,8	0,17
5	187,2	0,18	177,1	0,17

Таблица 3.4 – константы степенной взаимосвязи проводимости пламени σ [Ом⁻¹] и работы цикла A [Дж/с]

Добавка H ₂ , %	600 мин-1		900 мин-1	
	A	b	A	b
0	2538	0,12	6209	0,19
3	2655	0,12	3664	0,15
5	2565	0,12	3330	0,15

3.4 Выводы по результатам эксперимента

- 1 Характер зависимостей проводимости и скорости распространения пламени от состава смеси аналогичен известным исследованиям.
- 2 Скорость тепловыделения (средняя и в момент регистрации ионного тока) и средняя скорость распространения пламени увеличиваются при добавке водорода в ТВС.
- 3 Проводимость пламени практически не зависит от добавки водорода в ТВС, но наблюдается тенденция к небольшому росту проводимости при работе на бедных смесях.
- 4 Взаимосвязь проводимости пламени и всех оцениваемых параметров сгорания в цикле (скорость тепловыделения средняя и в момент регистрации ионного тока, средняя скорость распространения пламени и работа цикла) описывается степенной зависимостью.
- 5 Коэффициенты и показатели степенной функции взаимосвязи проводимости пламени со скоростью тепловыделения и со скоростью распространения пламени отличаются.
- 6 При добавке водорода в ТВС до 5% вид взаимосвязи проводимости пламени и оцениваемых параметров сгорания сохраняется, при этом закономерно изменяются её количественные характеристики: коэффициент A и показатель степени b снижаются.

4 Обсуждение результатов эксперимента

В результате эксперимента показано, что мгновенный (в момент измерения ионного тока) и средний за цикл характеристики скорости сгорания нелинейно связаны с электрической проводимостью пламени, то есть его ионизацией. Данный характер взаимосвязи может быть обоснован следующим.

Электрическая **проводимость пламени** определяется взаимосвязью [39]:

$$\sigma = \frac{n_e \cdot e^2 \cdot \tau}{m_e} \quad (4.1)$$
$$\sigma \sim n_e \tau$$

n_e – концентрация электронов,

e – заряд электрона

τ – среднее время свободного пробега электронов.

m_e – масса электрона

Время свободного пробега равно [40]

$$\tau = \frac{l}{v}$$

где l – средняя длина свободного пробега электрона,

v – средняя скорость электронов.

$$l = \frac{1}{4\pi r_0^2 n}$$

где n – концентрация всех частиц в реакционной зоне,

r – эффективный радиус молекулы

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$$

Тогда время свободного пробега:

$$\tau = \frac{l}{v} = \frac{1}{4\pi r_0^2 n} \cdot \sqrt{\frac{m_e}{3kT}}$$

$$\tau \sim \frac{1}{n \overline{T}}$$

И проводимость:

$$\sigma = \frac{n_e \cdot e^2}{m_e} \cdot \frac{1}{4\pi r_0^2 n} \cdot \frac{\overline{m_e}}{3kT}$$

$$\sigma \sim \frac{n_e}{n \overline{T}} \quad (4.2)$$

Известно [35], что для плоского метано-кислородного пламени с разбавлением азотом (при атмосферном давлении), концентрация электронов может быть связана со скоростью реакций сгорания степенной зависимостью:

$$n_e = w^\gamma \quad (4.3)$$

Принимая общность механизмов химической ионизации, запишем для нашего случая:

$$\sigma \sim \frac{w^\gamma}{n \overline{T}}$$

И, с учётом зависимости

$$P = nkT$$

(где T – температура пламени в зоне измерения ионного тока), получим:

$$\sigma \sim \frac{\overline{T} w^\gamma}{P} \quad (4.4)$$

Скорость тепловыделения зависит от скорости реакций горения и площади теплоотдающей поверхности (всей кривой поверхности фронта пламени) в момент измерения:

$$\frac{dQ}{d\tau} \sim w_i A_i \quad (4.5)$$

Так как поршень движется в составе кривошипно-шатунного механизма, то поверхность пламени нелинейно зависит от положения поршня в момент прихода пламени к точке установки ионизационного поршня. Однако предварительный расчёт показал, что в рамках одного скоростного режима в исследованном диапазоне составов смеси это отличие составляет не более 10% и для первичного качественного анализа можно им пренебречь.

Также абсолютная величина поверхности пламени определяется его искривленностью в результате турбулентных пульсаций. Уровень турбулентных пульсаций в одной и той же зоне камеры сгорания определяется в основном скоростным режимом. Поэтому в рамках одного скоростного режима, можно для первичного качественного анализа зависимостью скорости тепловыделения от поверхности пламени пренебречь. То есть

$$\frac{dQ}{d\tau} \sim w$$

Исходя из вышесказанного (зависимость проводимости от скорости реакций сгорания), можем записать:

$$\frac{dQ}{d\tau} \sim \sigma \cdot n \cdot \bar{T}^{\frac{1}{\gamma}} \sim \frac{\sigma \cdot P}{\bar{T}}^{\frac{1}{\gamma}} \quad (4.6)$$

В результате проведенного анализа, предложен уточненный вариант оценки взаимосвязи проводимости пламени и скорости тепловыделения с учетом температуры пламени и давления в камере сгорания. Для предварительных оценок взята расчётная адиабатическая температура пламени в зависимости от состава смеси по данным [43]. Результаты анализа корреляции скорости тепловыделения и параметра $\frac{\sigma \cdot P}{\bar{T}}$ по ф. (4.6) приведены на рис. 4.1. Выявленная

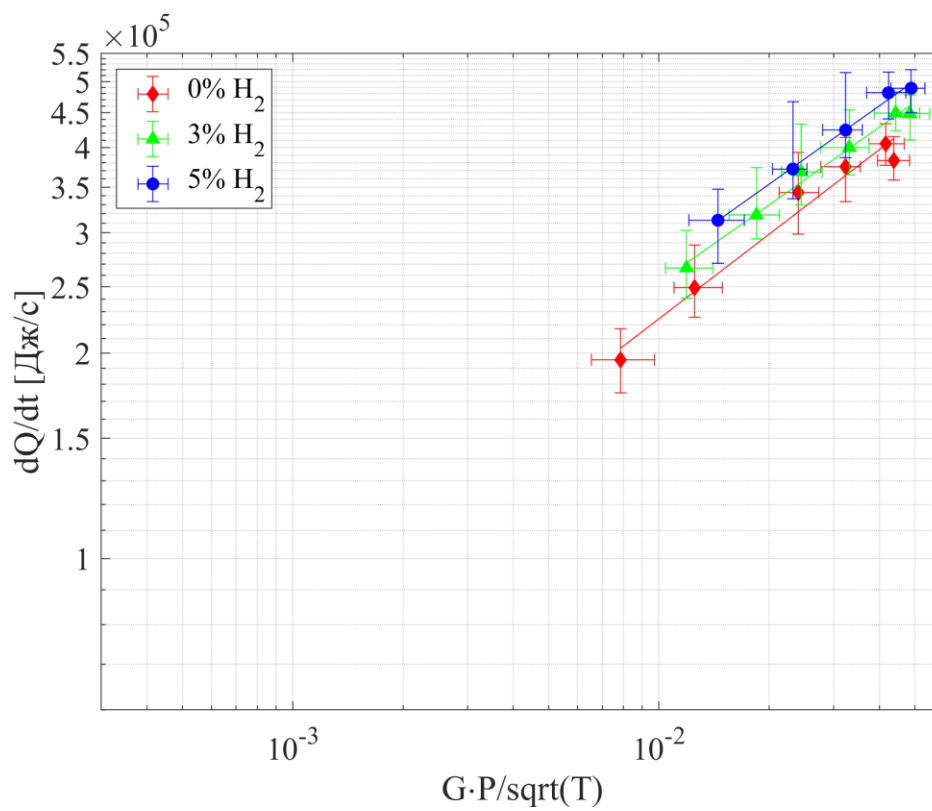
взаимосвязь может быть описана степенной зависимостью (3.1), численные характеристики которой приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – константы взаимосвязи скорости тепловыделения $\frac{dQ}{dt}$ [Дж/с] в момент сигнала ионного тока с проводимостью пламени, давлением и температурой (по ф. 4.6).

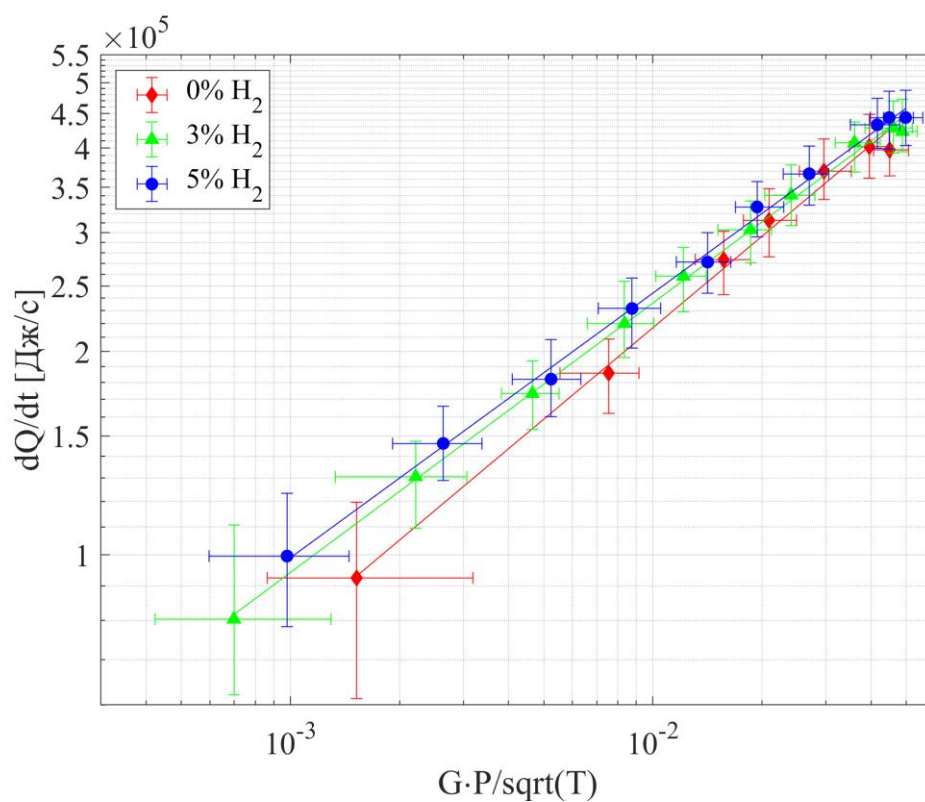
Добавка H ₂ , %	600 мин-1		900 мин-1	
	A	b	A	b
0	$1,49 \cdot 10^6$	0,412	$1,72 \cdot 10^6$	0,449
3	$1.45 \cdot 10^6$	0,378	$1.48 \cdot 10^6$	0,399
5	$1.57 \cdot 10^6$	0,381	$1.48 \cdot 10^6$	0,391

Коэффициенты детерминации (R^2) экспериментальных результатов по ф. 3.1 и по ф. 4.6 практически одинаковы и составляют 0,96 для исходной смеси и 0,99 для смеси с добавкой водорода. Сравнение полученных уравнений, а также коэффициентов корреляции полученных взаимосвязей 3.1 и 4.6 показывает, что в рамках исследованного диапазона варьируемых факторов, результаты, полученные по ф. 4.6, практически идентичны результатам, полученным по ф. 3.1. Это позволяет сказать, что основное влияние на процесс химионизации пламени в условиях эксперимента оказывает не давление и температура, а именно химические факторы – состав смеси и добавка водорода.

Таким образом, в результате эксперимента выявлена степенная взаимосвязь проводимости пламени и скорости сгорания. В известных исследованиях [35] также показана степенная взаимосвязь ионизации пламени и скорости реакций сгорания, но в других условиях. Это говорит об общности механизмов химионизации и подтверждает отсутствие противоречия полученного экспериментального результата и научных представлений о физике горения, известных по данному вопросу.



а



б

Рисунок 3.10 – Взаимосвязь произведения проводимости пламени и давления с тепловыделением для двух скоростных режимов (а – 600, б – 900 мин^{-1}).

Интерес представляют значения показателей в степенных зависимостях, описывающих взаимосвязь ионизации пламени со скоростью сгорания и работой цикла.

Во-первых, значение показателя степени больше для скорости тепловыделения (как в момент сигнала ионного тока, так и средней за цикл), чем для средней скорости пламени и работы цикла. Это в принципе соответствует физическим смыслам анализируемых параметров сгорания: скорость тепловыделения прямо пропорциональна скорости выгорания массы топлива, а линейная скорость распространения пламени характеризует объём, занятый продуктами сгорания. Масса и объём выгоревшей, как в камере сгорания постоянного объёма, так и в камере сгорания ДВС, смеси связаны нелинейно [42]. Это же подтверждается взаимосвязью средней скорости распространения пламени и средней скорости тепловыделения, представленной на рис. 4.2.

Параметры взаимосвязи работы цикла с проводимостью пламени также отличаются. Это связано с тем, что работа определяется не только массой сгоревшей смеси, но и КПД процесса, который связан с варьируемым фактором (коэффициентом избытка воздуха) также нелинейно [42].

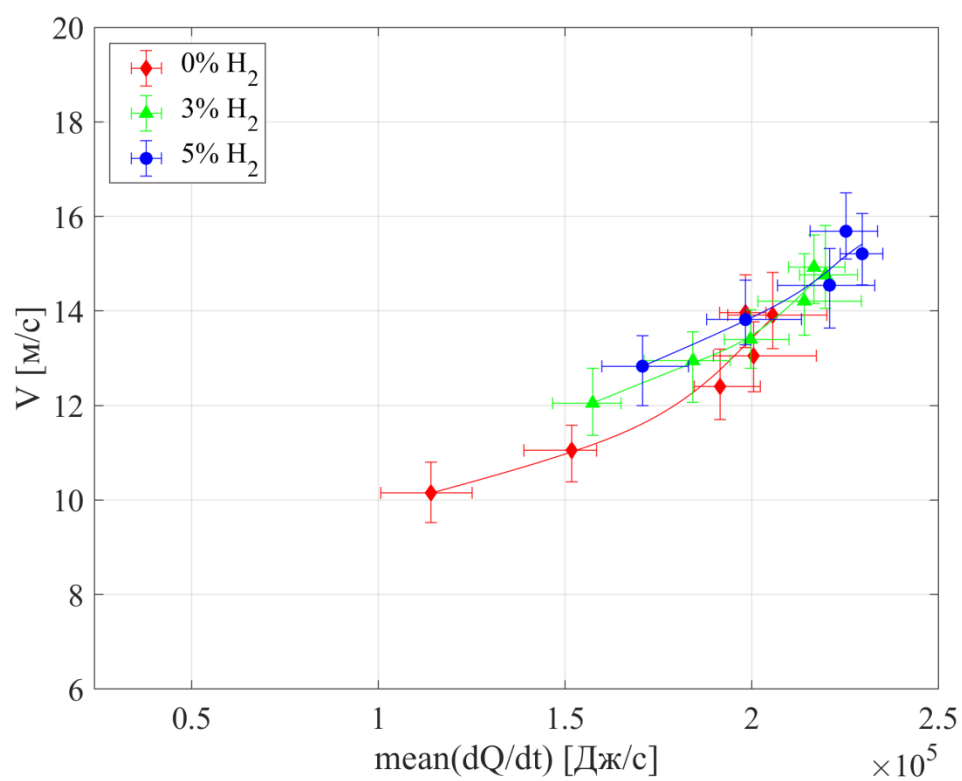
Во-вторых, снижение коэффициента A и показателя степени b при добавке водорода в ТВС во всех исследованных взаимосвязях показывает большее возрастание скорости сгорания, нежели чем ионизации пламени. Увеличение скорости сгорания является следствием промотирования процесса водородом. Снижение влияния ионизированных реакций на процесс сгорания может быть следствием как физического, так и химического механизма промотирования горения. При физическом механизме действие водорода может быть объяснено значительно более высокими, чем у бензина значениями коэффициента диффузии, нормальной скорости распространения пламени, удельной теплоты сгорания и значительно более широкими концентрационными пределами горения. При химическом механизме, вероятно, становится либо меньше ионизированных стадий, либо изменяется скорость этих реакций, либо, на фоне возрастающих скоростей неионизированных стадий, относительное участие

ионизированных стадий снижается. Возможно, это связано с уменьшением относительной доли водорода в ТВС и снижением концентрации радикала CH , как это предположено в [41].

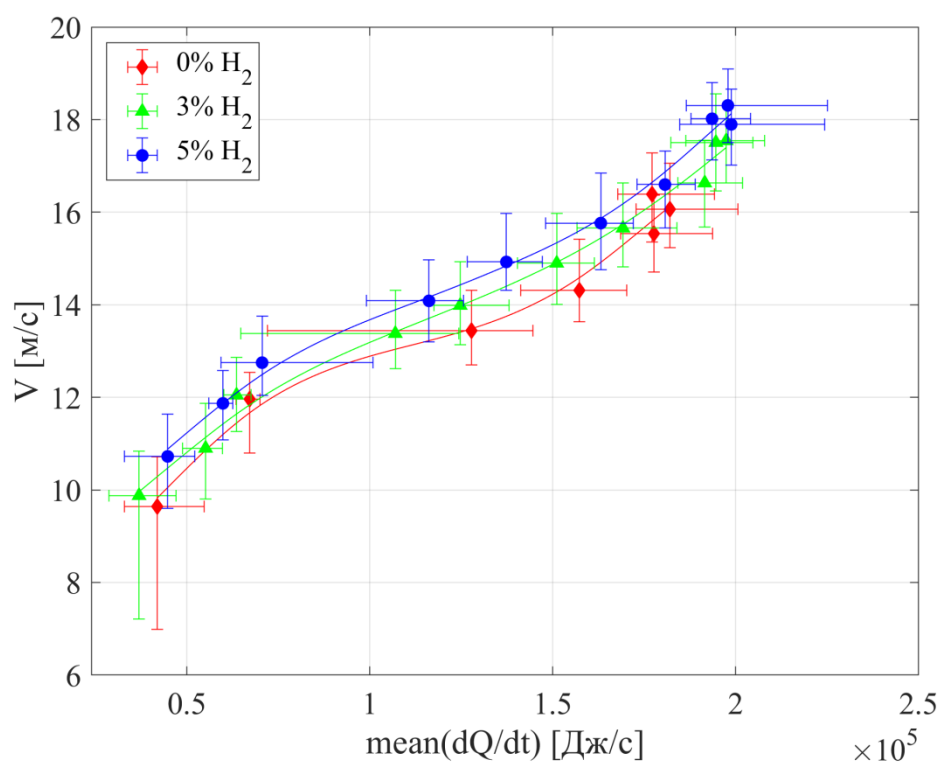
Вероятнее всего, в условиях ДВС действуют оба механизма действия водорода. Для того чтобы более точно сказать, свидетельствует ли изменение количественных характеристик взаимосвязи проводимости (ионизации) пламени со скоростью сгорания о влиянии водорода именно на кинетику, необходимы дополнительные исследования.

Нелинейность выявленных взаимосвязей показывает сложное влияние ионизированных стадий реакций горения на процесс сгорания в ДВС. Степенной характер взаимосвязей может быть объяснен аналогичной взаимосвязью скорости ионизации и общей скорости реакций горения [35]. Выявленные взаимосвязи позволяют оценивать как мгновенную, так и среднюю за цикл скорость сгорания, анализируя проводимость пламени. Анализ взаимосвязей и выявление их изменений позволяет выявлять изменения в процессе сгорания, как это показано при добавке водорода в ТВС. Нарушение взаимосвязи проводимости пламени и скорости сгорания позволят выявить и, возможно, локализовать аномальные процессы при горении.

Особенность полученного результата заключается в том, что замер проводимости пламени в локальной зоне камеры сгорания, объём которой на примерно три порядка меньше размера всей камеры сгорания характеризует всю систему. При этом очевидно, что свойства системы в каждый момент сгорания не изотропны. То есть имеется как минимум три отличающиеся зоны: свежая смесь, продукты сгорания и фронт пламени. Хотя, возможно, это следствие хорошего смесеобразования и равномерного распределения свойств смеси по камере сгорания. Но, несомненно, разные части смеси горят при разных условиях (давлении и температуре в камере сгорания), но при этом взаимосвязь средних за цикл характеристик сгорания с локально измеренной проводимостью пламени сохраняется.



а



б

Рисунок 4.2 – Взаимосвязь средней скорости распространения пламени и средней скорости тепловыделения (а – 600, б – 900 мин^{-1}).

Таким образом, локальная оценка свойства фронта пламени в течение достаточно короткого промежутка времени (существование сигнала ионизационного зонда) отражает характер сгорания в целом в цикле. Это представляется интересным фактом, полезным для возможного применения в системах диагностики сгорания. Однако межцикловое рассеяние значений проводимости пламени и нелинейная взаимосвязь со скоростью горения означают необходимость использования дополнительных параметров оценки сигнала ионного тока для применения в системах управления ДВС. Это могут быть время возникновения сигнала, его колебания и т.д.

Заключение

В результате экспериментов на одноцилиндровом исследовательском ДВС с искровым зажиганием показана возможность анализа процессов горения с помощью ионизации пламени. В условиях ДВС показана степенная взаимосвязь проводимости пламени и скорости сгорания, как в момент сигнала ионного тока, так и средней за цикл, что является очень информативным параметром оценки протекания рабочего процесса ДВС.

Полученный экспериментальный результат соответствует известным представлениям о физике горения, что подтверждается теоретическим анализом и сходимостью с результатами известных исследований. При этом новизна обусловлена впервые выявленными для условий ДВС закономерностями, подтверждающими общность механизмов ионизации углеводородного пламени. Кроме того, закономерности сохраняются и при добавке водорода в ТВС.

Возможность анализа процесса в целом с помощью измерения локального свойства фронта пламени в течение достаточно короткого промежутка времени является результатом, полезным для развития систем диагностики сгорания.

Результаты исследования горения с помощью ионизации пламени в ДВС позволяют развивать методологию диагностики энергетических машин и применять в системах управления и в сервисном обслуживании. Однако для достаточного методологического обоснования метода необходимы углубленные эксперименты.

Намечены пути дальнейшего развития работы. В частности это эксперименты на разных типах камер сгорания.

Список используемых источников

1. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. [Текст] / Р.З. Кавтарадзе – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
2. Kohse-Höinghaus K.. Combustion at the focus: laser diagnostics and control / K. Kohse-Höinghaus, R. S. Barlow, M. Aldén and J. Wolfrum // Proceedings of the Combustion Institute, 30 - 2005 - P. 89-123.
3. Aldén M. Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic techniques / M. Aldén, J. Bood, Z-S Li and M. Richter // Proceedings of the Combustion Institute, 33- 2011 – P. 66-97.
4. Graf N. In-Cylinder Combustion Visualization in an Auto-Igniting Gasoline Engine using Fuel Tracer- and Formaldehyde-LIF Imaging / N. Graf., J. Gronki, C. Schulz, T. Baritaud, J. Cherel, P. Duret, J. Lavy // SAE paper - 2001-01-1924
5. Калькот Г. Процессы образования ионов в пламени [Текст] / Г. Калькот // Вопросы ракетной техники. – 1958. – №4. – С. 78-94.
6. Соколик А. С. О природе химионизации пламен [Текст] / А. С. Соколик, С. Е. Семенов // Журнал физической химии. – 1964. – №7. – С. 1784-1789.
7. Лоутон Дж. Электрические аспекты горения [Текст] / Дж. Лаутон, Ф. Вайнберг – М.: Энергия, 1976. – 194 с.
8. Степанов Е. М. Ионизация в пламени и электрическое поле / Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков // М.: Металлургия – 1968 - С. 311.
9. Shimasaki, Y. Kanehiro, M, Baba, S. Maruyama, S., Hisaki, T. and Miyata, S. (1993). Spark Plug Voltage Analysis for Monitoring Combustion in an Internal Combustion Engine. SAE paper 930461.
10. L. Eriksson, L. Nielsen, and J. Nytoft, “Ignition Control by Ionization Current Interpretation”, SAE paper 960045 presented at the International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, March 1-March 5, 1996.

11. Saitzkoff A. In-Cylinder Pressure Measurements Using the Sparg Plug as an Ionization Sensor // A. Saitzkoff , R. Reinmann, F. Mauss and M. Glavmo // SAE 970857.
12. Yoshiyama, S., Tomita, E., and Hamamoto, Y., "Fundamental Study on Combustion Diagnostics Using a Spark Plug as Ion Probe," SAE Technical Paper 2000-01-2828, 2000, doi:10.4271/2000-01-2828.
13. Yoshiyama, S. and Tomita, E. Combustion Diagnostics of a Spark Ignition Engine Using a Spark Plug as an Ion Probe. SAE Paper Number 2002-01-2838.
14. GAZIS, A. et al, Computationally inexpensive methods of ion current signal manipulation for predicting the characteristics of engine incylinder pressure. International Journal of Engine Research, 2006, 7 (3), pp. 271-282.
15. Malaczynski G. W. Ion-Sense-Based Real-Time Combustion Sensing for Closed Loop Engine Control / G. W. Malaczynski, G. Roth, D. Johnson // SAE Int. J. Engines 6(1):2013, doi:10.4271/2013-01-0354.
16. Yintong Liu, Jun Deng, Zongjie Hu, Liguang Li In-cycle combustion feedback control for abnormal combustion based on digital ion current signal 2017 International Journal of Engine Research 19(2):146808741773165 DOI: 10.1177/1468087417731653
17. Guangyu Dong, Yulin Chen, Liguang Li, Zhijun Wu, Robert Dibble. (2017) A skeletal gasoline flame ionization mechanism for combustion timing prediction on HCCI engines. Proceedings of the Combustion Institute 36:3, pages 3669-3676.
18. H. F. Calcote, "Ion and Electron Profiles in Flames", 9th International Symposium on Combustion, pp. 622 – 637, 1962.
19. J. A. Green, and T. M. Sugden, "Some Observations on the Mechanism of Ionization in Flames Containing Hydrocarbons", 9th International Symposium on Combustion, pp. 607-621, 1962.

20. Nair, S., Rajaram, R., Meyers, A.J., Lieuwen, T. C., Tozzi, L. and Benson, K. (2005). Acoustic and ion sensing of lean blowout in an aircraft combustor simulator. AIAA paper 2005-0932.
21. Corcione F. E. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion-current System and Optical Diagnostics of Radical Species / F. E. Corcione, B. M. Vaglieco, S. S. Merola // Proceeding on 6th COMODIA Symposium. – 2004. – №6. 487-495.
22. Aithal S. M. Numerical Investigation of Ion and Radical Compositions in Fuel-Air Mixtures for High-Speed Flows 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 2015.
23. Wilstermann H. Ignition System Integrated AC Ion Current Sensing for Robust and Reliable Online Engine Control / H. Wilstermann, A. Greiner, P. Hohner, R. Kemmler, R.R. Maly and J. Shenk // SAE - 2000-01-0553.
24. Franke A. Application of advanced laser diagnostics for the investigation of the ionization sensor signal in a combustion bomb. Appl. Phys. B 81, 1135–1142 (2005).
25. R. Reinmann, A. Saitzkoff, and F. Mauss, "Local Air-Fuel Ratio Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor", SAE paper 970856, March 1997.
26. А. М. Старик, Н. С. Титова Кинетика образования ионов при объемной реакции метана с воздухом. Физика горения и взрыва 2002, №3 Стр. 3-20.
27. Saitzkoff, A., Reinmann, R., Berglind, T. and Glavmo, M. (1996). An Ionization Equilibrium Analysis of the Spark Plug as an Ionization Sensor. SAE Paper Number: 960337.
28. Naoumov, V., Demin, A., Andersson, I. and Sokolov, A. (2002). Modeling of Combustion and Non-Equilibrium Ionization in Spark Ignition Engines. SAE Paper Number: 2002-01-0009.
29. Yamashita, K. Karnani, S. and Dunn-Rankin, S. (2009). Numerical Prediction of Ion Current from a Small Methane Jet Flame. Combustion and Flame, 156, 1227.

30. Aithal S. Analysis of the current signature in a constant-volume combustion chamber Combustion Science and Technology Volume 185, 2013 - Issue 2.
31. Талантов А.В. Основы теории горения /А.В. Талантов // Издательство КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, 1975. – С. 252.
32. Peters N. Turbulent Combustion. Cambridge University Press, 2004 p. 322 p.
33. Иноземцев Н. Н. Ионизация в ламинарных пламенах / Н. Н. Иноземцев // Известия АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика. – 1960. – №2,. – С. 59-66.
34. Семенов Е. С., Соколик А. С. Исследование ионизации в сферических пламенах методом зондовых характеристик // ЖТФ. 1962. Т. 32. Вып. 9. С. 1074.
35. Аравин Г. С. О связи между скоростями химической ионизации и реакции горения в ламинарном пламени / Г. С. Аравин, Е. С. Семенов // ФГВ 1979, №5, стр. 40-46.
36. Ясников И.С. К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме / И.С. Ясников, П.В. Ивашин, А.П. Шайкин // Журнал технической физики, 2013, том 83, вып. 11, стр. 39-43.
37. Merker G.P Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development / Günter P. Merker, Christian Schwarz, Gunnar Stiesch, Frank Otto. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
38. Стечкин Б. С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя [Текст] / Б. С. Стечкин, К. И. Генкин, В. С. Золотаревский и др. – М.: АН СССР, 1960. – 198 с.
39. Парселл Э. Берклевский курс физики. — Издание 3-е, исправленное. — М.: Наука, 1983. — Т. II. Электричество и магнетизм. — С. 137-138. — 416 с.
40. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. – М.: Высшая школа, 1981.— 400 с.
41. Шайкин А.П. Скорость распространения и ионизация пламени при сжигании бензина и метана с добавкой водорода / А. П. Шайкин, П. В. Ивашин, И. Р.

- Галиев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета №2 (40) 2013 г. стр. 140 – 148.
42. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, N.Y., 1988.
43. Poinso T. Theoretical and Numerical Combustion 2nd Ed. / T. Poinso, D. Veynante // R.T. Edwards, Philadelphia, USA (2005).