

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 Взаимосвязь электропроводности пламени с токсичностью
отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с
промотирующими добавками водорода

Студент(ка)

Л.А. Заживихина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель магистерской
программы

д.т.н., профессор А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2019 г.

Допустить к защите

Зав. кафедрой «ЭМСУ»

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2019 г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода	7
1.1 Обзор литературных источников по возможности применения электропроводности пламени для диагностики и управления ДВС ...	8
1.2 Процессы ионизации при сгорании	14
1.2.1 Общие положения	14
1.2.2 Химио-ионизация	16
1.2.3 Термическая ионизация.....	17
1.2.4 Электронное присоединение.....	18
1.3 Перспективы применения явления электропроводности пламени в ДВС	19
1.4 Токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода	24
1.4.1 Условия образования несгоревших углеводородов в отработавших газах бензинового двигателя с промотирующими добавками водорода.....	24
1.4.2 Известные данные о наличии взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.....	26
ГЛАВА 2 Описание экспериментальной части исследования	32
2.1 Экспериментальная установка	32
2.2 Построение модели для моделирования влияния топлива на токсичность отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода	37

2.2.1 Создание четырехцилиндровой модели на основе одноцилиндровой.....	37
2.2.2 Графики с результатами имитационного моделирования	46
2.3 Заключение по 2 главе	49
ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода	50
3.1 Результаты экспериментальных исследований	50
ГЛАВА 4 Возможности снижения токсичности отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода	56
4.1 Концентрация СН в двигателе ВАЗ-2111	57
4.2 Взаимосвязь электропроводности пламени с составом смеси, режимами работы двигателя (ϵ , n) и качеством ТВС	58
4.3 Связь токсичности по несгоревшим углеводородам с характеристиками электропроводности пламени	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	68

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В Тольяттинском государственном университете на протяжении многих лет проводятся теоретические и экспериментальные исследования ряда актуальных проблем по вопросам воспламенения и сгорания в условиях поршневого ДВС. При исследовании зависимостей распространения пламени от режимных параметров работы и от качества ТВС использовались специально спроектированные ионизационные датчики, устанавливаемые в камеру сгорания двигателя так, чтобы определять среднюю скорость распространения пламени и в основной, и в заключительной фазе сгорания.

Одним из наиболее перспективных направлений обеспечения перспективных норм по токсичности при сохранении или повышении экономичности работы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является добавка водорода в топливно-воздушную смесь (ТВС) [1-4].

До последнего времени в нашей стране определение эффективности добавок водорода или применения альтернативных видов топлива производилось лишь по параметрам ТВС на входе, крутящего момента двигателя и концентрации токсичных выделений. Параметры процесса сгорания в двигателе не определялись.

Для определения условий протекания рабочего процесса в ДВС при добавках водорода в ТВС, обеспечивающих выполнение норм ЕВРО-3 для существующих двигателей ЕВРО-2 и ЕВРО-4 для двигателей ЕВРО-3, проведены исследования на одноцилиндровой установке УИТ-85 и двигателе с впрыском топлива ВАЗ-2111.

Целью работы является выявление возможностей снижения токсичности отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением **следующих задач:**

1. провести оценку наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.
2. выявить возможности снижения токсичности отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

Объект исследования: бензиновый ДВС с промотирующими добавками водорода.

Предмет исследования: токсичности отработавших газов по углеводородам.

Методы исследования. Метод экспериментального исследования, метод статистической обработки результатов эксперимента и моделирования рабочего процесса

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

Научная новизна исследования

Выявлены возможности снижения токсичности отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

Практическая значимость работы:

Обобщены результаты экспериментальных исследований по возможностям снижения токсичности отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

На защиту выносятся:

1. оценка наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода;
2. возможности снижения токсичности отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научных и обсуждались на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» и на конференции в 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 1 печатная работа.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 48 наименования, 23 из которых на иностранном языке. Работа изложена на 73 страницах машинописного текста, иллюстрированного 1 таблицей и 48 рисунками.

ГЛАВА 1 Изучение литературы для выявления и оценке наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода

Датчик ионизации является электрическим зондом для диагностики двигателей внутреннего сгорания. Процесс горения влияет на электрические свойства газа в цилиндре. Таким образом, сигнал датчика содержит обширную информацию об условиях в камере сгорания. Тщательная характеристика датчика позволяет использовать большую часть этой информации для управления обратной связью двигателя. В настоящей работе основное внимание уделяется выявлению основных механизмов функционирования ионизационного датчика и их взаимодействия. Для характеристики датчика использовались оптическая диагностика, анализ равновесия и элементарная модель. Было обнаружено, что контакт между фронтом пламени и катодом, а также состав смеси вдоль основного токового тракта регулирует сигнал датчика во время раннего сгорания. На основе этих данных была предложена зональная модель для датчика. Отображение распространения пламени показало, что турбулентность искажает форму первого токового пика, воздействуя на контакт между катодом и морщинистым фронтом пламени. Экспериментальные данные и анализ ионизационного равновесия в постпламенном газе показали, что следы щелочных металлов в атмосфере вносят основной вклад в термическую ионизацию при температурах, характерных для горения разбавленных смесей. Исследование взаимосвязи между давлением в цилиндре и сигналом датчика ионизации при различных условиях потока газа показало, что высокий поток газа нарушает эту зависимость. Изображения оксида азота и гидроксильных радикалов в постпламенном газе дают экспериментальные данные о том, что поток холодного, возможно несгоревшего газа из края

камеры сгорания в область электродного зазора может объяснить это нарушение. Полученные знания, мы надеемся, помогут улучшить алгоритмы получения информации от сигнала датчика и использовать эту информацию для мониторинга и оптимизации процесса горения.

1.1 Обзор литературных источников по возможности применения электропроводности пламени для диагностики и управления ДВС

Транспортный сектор будет иметь решающее значение для развития энергетики в Европе в течение следующих нескольких десятилетий [1]. Поскольку уровень жизни в странах третьего мира и пороговых странах развивается, следует ожидать и увеличения числа мотористов. Сегодня в транспортном секторе доминируют двигатели внутреннего сгорания. Хотя альтернативные решения, такие как транспортные средства, работающие на топливных элементах, привлекают все больше внимания и, безусловно, станут важными в будущем, традиционный двигатель внутреннего сгорания с высокой плотностью мощности и масштабируемостью будет по-прежнему доминировать во многих секторах. Потенциал этой технологии еще не исчерпан. В настоящее время разрабатываются более современные технологии двигателей. Электронное управление двигателем может повысить эффективность двигателей внутреннего сгорания. Для оперативного управления двигателем требуется непрерывная информация о процессе сгорания. Наиболее эффективным способом сбора этой информации является измерение непосредственно в камере сгорания. Для этой цели существуют различные варианты, например, датчики давления или волоконная оптика. Ионный датчик, состоящий из уже имеющейся свечи зажигания плюс дополнительная недорогая считывающая электроника, представляет собой экономически эффективную альтернативу этим решениям. Ионизация в пламени находилась в фокусе науки в 1950-х и 60-х годах, когда целью было оптимизировать магнитогидродинамические преобразователи энергии и

понять образование ионизированных газов, например. ракетные выхлопы [2]. В последние годы исследователи также осознали значимость ионизации для образования сажи в пламени [3]. Еще одно применение этого явления появилось в течение последнего десятилетия: диагностика горения с использованием электрических датчиков в двигателях внутреннего сгорания. В настоящее время датчик используется для обнаружения пропусков зажигания и детонации двигателя, и изучается его удобство в управлении коэффициентом эквивалентности и стабильностью горения. Выброс энергии во время горения приводит к образованию ионов и изменяет электрические свойства газа. Это дает возможность использовать проводимость газа в качестве диагностического параметра для сгорания. В двигателях с искровым зажиганием (SI) основная цель свечи зажигания - инициировать процесс горения. Однако свеча зажигания также может действовать как датчик. Это достигается путем приложения напряжения через электродный зазор свечи зажигания после зажигания смеси. Это напряжение низкое по сравнению с напряжением, используемым для инициирующего пламя разряда, но будет вызывать детектируемый ток. Поскольку на проводимость газа сильно влияет процесс горения, ток можно использовать для мониторинга этого процесса. Для получения этой функциональности дополнительное оборудование не требуется в камере сгорания. Этот тип датчика, называемый ионным зондом или ионизационным датчиком, уже нашел широкое применение в диагностике горения в двигателях внутреннего сгорания, что помогает оптимизировать процесс сгорания и, таким образом, минимизировать расход топлива и выбросы выхлопных газов [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. До сих пор многое было достигнуто с помощью сложного анализа данных, например, путем сопоставления некоторых особенностей кривых тока с другими данными двигателя, такими как давление или состав смеси.

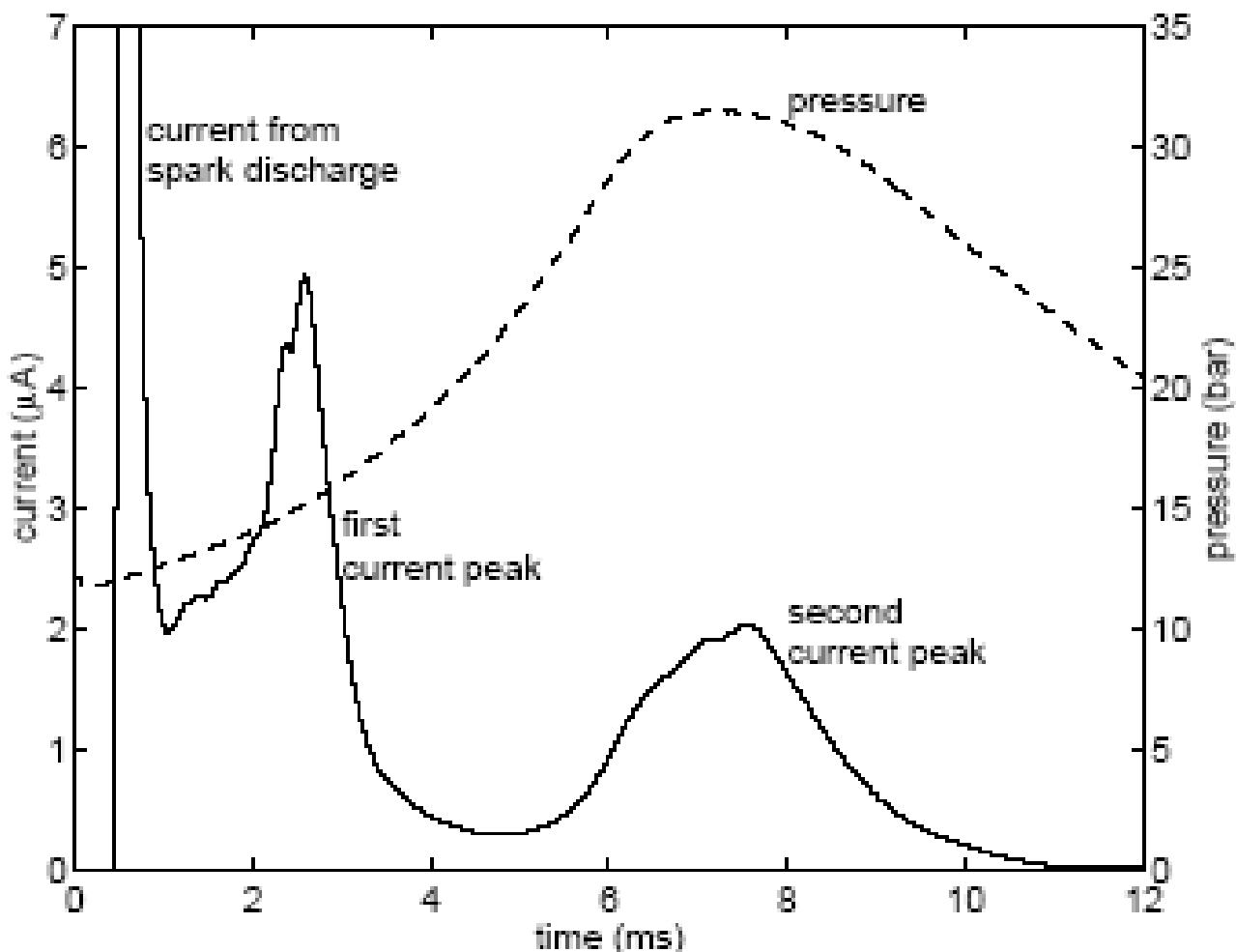


Рисунок 1.1 - Типичный ток датчика ионизации в свече зажигания и соответствующее индикаторное давление, измеренное в двигателе.

Типичный пример тока, измеренного в двигателе, представлен на рисунке 1.1 вместе с трассой давления, показывающей энерговыделение при сгорании. В текущем состоянии можно заметить три отличных пика. Самый первый пик реплицирует искровой разряд, инициирующий пламя, и здесь не рассматривается. В оставшемся сигнале можно выделить две части. Первое, как правило, связано с контактом между электродами и малым ядром пламени. В этом случае химионизация считается доминирующим механизмом для создания проводящего канала между электродами [2]. Второй, который совпадает с пиком давления, обычно понимается как результат термической ионизации из-за высокой температуры в сожженных газах [17, 19], хотя другие наблюдения указывают на связь между контактом пламени электрода и стен камеры сгорания и этого сигнала [19]. Как правило,

ионный чувствительный ток сильно варьируется в зависимости от условий работы двигателя, но два пика, описанные выше, могут быть почти всегда идентифицированы. Инженеры пытаются использовать ионизационный датчик для диагностических целей в двигателях внутреннего сгорания. Цель состоит в том, чтобы получить информацию от сгорания, подобную той, которая была собрана датчиками давления, но более экономически эффективна, и использовать эту информацию для контроля обратной связи параметров, регулирующих работу двигателя. Осечка значительно увеличивает выбросы углеводородов, снижает общую эффективность и приводит к сильным колебаниям частоты вращения двигателя. Ли и Пико [10] использовали интегральный сигнал тока для обнаружения пропуска зажигания, в то время как Auzins et al. [11] выбрал низкочастотный отфильтрованный сигнал. VanDyne et al. [17] реализовано обнаружение пропуска зажигания путем отображения интегрированного среднего эффективного давления (IMEP) и сигнала интегрированного датчика ионизации, но возникли проблемы при работе с низкой нагрузкой из-за слабого сигнала датчика. Ohashi et al. [14] определил свойство, называемое «условием горения», из текущего сигнала и оценил его, чтобы обнаружить пропуски зажигания. Стук - это неконтролируемое горение, вызванное нагревом несгоревших газов из-за одновременного сжатия движущимся фронтом пламени и поршнем, что приводит к волнам давления в камере сгорания. Они, в свою очередь, могут вызывать соответствующие изменения локальной температуры и, таким образом, влиять на ионизацию локально. Этот эффект позволяет обнаруживать детонацию с помощью ионизационного зондирования, как показано в нескольких публикациях [11, 14]. Соотношение воздух-топливо представляет интерес из-за его важности для эффективности трехкомпонентного катализатора. Клементс и Сми [18] изучили влияние соотношения воздух-топливо на ток на отрицательный зонд в двигателе и обнаружили, что он слегка падает на богатой стороне. Hellring et al. [13] использовали нейронные сети для оценки значений лямбда.

Klovmark et al. [8] выполнил гауссовскую параметризацию сигнала и использовал полученные параметры вместе с углом зажигания и информацией о скорости вращения двигателя для оценки коэффициента воздушного топлива с точностью до 0,1% при среднеквадратичной ошибке. В сочетании с внешним кислородным датчиком в выхлопной трубе этот метод может использоваться для балансировки цилиндров коэффициента эквивалентности. Пиковая информация о давлении необходима для контроля за искровым зажиганием, чтобы оптимизировать эффективность двигателя. Исследованы перспективы оценки положения пикового давления по токовому сигналу [7, 9, 12]. Hellring and Holmberg [9] сравнили несколько алгоритмов и обнаружили, что алгоритм нахождения пика, приведенный в ссылке [9], «превосходит своих конкурентов», представлен в ссылках [18] и [19].

Нестабильное сжигание является общей проблемой при использовании сильно разбавленных смесей. Андерссон и Эрикссон [6] исследовали коэффициенты изменения интеграла тока датчика и интегрированного среднего эффективного давления (ИМЕР) в прямом инжектированном двигателе и пришли к выводу, что эти два свойства тесно связаны. Byttner et al. [4] исследовал изменение ИМЕР и сигнала ионного тока в двигателе, как в лабораторных условиях, так и на дороге. Они обнаружили, что корреляции между этими двумя свойствами слабее при реальных условиях движения и что корреляции существуют только для стехиометрических или более компактных соотношений воздух-топливо. Кроме того, корреляция исчезает при высоких нагрузках: в текущем сигнале сохраняется значительное изменение, в то время как относительное изменение ИМЕР почти исчезает. Peron et al. [11] обобщил преимущества и недостатки ионизационного датчика, в частности, в отношении датчиков давления, и пришел к выводу, что он более полезен для качественной диагностики. При использовании для количественной диагностики рекомендуется использовать относительные меры, такие как коэффициент вариации вместо абсолютных. По сравнению с

большим объемом работы, связанной с применением, число фундаментальных исследований ионизационного датчика выглядит довольно небольшим. Однако фундаментальная работа над таким датчиком является решающей для того, чтобы повысить наше понимание управляющих процессов и их взаимодействия. Знание об этом облегчает интерпретацию сигнала и помогает в разработке и оптимизации алгоритмов управления двигателем. Рейнманн [12] представил модели как для первого, так и для второго пиков в токе датчика. Reinmann et al. [19] установлено, что концентрация иона H_3O^+ пропорциональна квадратному корню из отношения эквивалентности. Предполагается, что этот ион является одним из наиболее распространенных в пламени углеводородов [13, 14]. Saitzkoff et al. [17] выполнил анализ ионизационного равновесия сгоревшего газа для расчета тока при основном сгорании. Несмотря на упрощающие предположения о электрическом поле и транспортных свойствах газа, а также пренебрежение электроотрицательными видами, было получено разумное качественное согласие с экспериментальными данными. Несколько лет назад Вильстерманн [15] представил результаты комплексных исследований ионизационного датчика. Объединив накопленные знания об образовании и поведении ионов в пламени с электродинамическими расчетами, химической кинетикой и симуляцией цикла двигателя, Уилстерманн разработал мощный инструмент, способный имитировать токи датчиков в произвольной геометрии двигателя. В модель были включены как химиоионизация, так и термическая ионизация, а также рекомбинация и диффузия. Согласование между имитируемыми и измеренными токами удивительно. К сожалению, редкая документация по алгоритмам и данным химической кинетики, используемая для получения, в частности, степени химической ионизации, затрудняет оценку результатов и использование этой работы. Вильстерманн также провел обширные экспериментальные исследования в двигателях внутреннего сгорания. В дополнение к параметрическим исследованиям были проведены исследования роли

геометрии свечи зажигания. Было обнаружено, что размер центрального электрода (анода) оказывает влияние на ток нелинейным образом. Это объясняет Вильстерманн с измененной площадью контакта и однородностью однородного электрического поля. Еще один интересный вывод заключался в том, что удаление бокового электрода (катода) не влияет на ток. Это, по-видимому, противоречит выводам Yoshiyama et al. [16], который проводил эксперименты как в бомбе с постоянным объемом, так и в двигателе, и наблюдал, что изоляционные части катода уменьшают ток и что соединительный катод, и стенка цилиндра приводят к более выраженному току при основном сгорании, тогда как второй пик исчез, когда они прервали эту связь. В последнее время Naoumov et al. [15] введена новая модель, позволяющая моделировать горения и ионизационный ток. Naoumov et al. применяют неравновесные методы для обоих пиков тока датчика, но без каких-либо очевидных улучшений по сравнению с имитациями Wilstermann или Reinmann. Использование неравновесного подхода для второго пика может быть не ошибочным, но представляется излишним при рассмотрении того, насколько быстро ионизация следует за изменениями температуры, например. в случае стука. Тезис, который недавно представил Андерссон [16], касается моделирования второго токового пика. Андерссон использовал модель, разработанную Saitzkoff et al. [17], и добавил улучшенные подмодели для давления в цилиндре, для образования оксида азота и для температуры сгоревшего газа, близкого к электродному зазору.

1.2 Процессы ионизации при сгорании

1.2.1 Общие положения

Чтобы понять электрические свойства пламени, важно получить информацию о концентрациях различных видов заряженных частиц, присутствующих во время горения. Возможными носителями являются электроны, положительные и отрицательные ионы. Как видно из раздела 1.2,

их способность переносить ток сильно различается. Цель этого раздела - предоставить справочную информацию о различных физических и химических процессах, связанных с образованием ионов. Говоря об ионах, нужно различать положительные ионы, образованные отрывом электронов, и отрицательные ионы, образованные электронным присоединением. В дальнейшем ионизация относится к образованию положительных ионов. Как правило, отрыв электрона требует энергии. Эта энергия может быть обеспечена различными процессами. Например, ионизация атомов или молекул осуществляется электромагнитным излучением или столкновением с высокоэнергетическими частицами в фазе предварительного пробоя искрового разряда. Однако в пламени доминируют другие процессы. Положительные ионы могут образовываться в результате химической реакции, называемой химио-ионизацией. С другой стороны, если температура в газе становится достаточно высокой, кинетическая энергия частиц может быть достаточной для обеспечения необходимого количества энергии во время столкновений. Этот процесс, следовательно, называется термической ионизацией. Эти два процесса рассматриваются как наиболее важные способы формирования положительных ионов в пламени и будут предметом следующих двух разделов. Пламя обеспечивает идеальные условия для образования отрицательных ионов из-за обилия электроотрицательных видов. Электронное присоединение потребляет свободные электроны и уменьшает проводимость газа. Привязка электрона к электроотрицательным видам обсуждается в разделе 1.1.4. Тот факт, что пламя проявляет электропроводность, известен с XVII века [17]. Первые систематические исследования этого вопроса датируются началом двадцатого века, и в 1950-х и 1960-х годах он приобрел больше интереса, когда была тщательно изучена возможность генерации электрической энергии с помощью магнитогидродинамических (МГД) преобразователей. В течение последнего десятилетия вопрос об образовании ионов в пламени снова перешел в фокус исследований сжигания, поскольку роль ионов

полиароматических углеводородов (ПАУ) в образовании сажи стала более ясной и из-за попыток разработать зонды для диагностики горения основанный на электрических свойствах газа при горении. Недавно Фиалков [18] дал всесторонний обзор по вопросу о пламени ионов.

1.2.2 Химио-ионизация

Химические реакции между стабильными видами требуют активации энергии активации E_a . Часто эта энергия обеспечивается в виде тепловой энергии. Реакции, которые потенциально могут привести к ионизации одного продукта, должны быть экзоэнергетическими, то есть. Они должны выделять энергию. Поскольку энергетический баланс в химической реакции обычно выражается через энтальпию реакции, которая представляет собой разность энтальпий образования продуктов и реагентов, это соответствует <0 . Реакция с участием двух реагентов (A и B) и два произведения (C и D), для которых это отношение имеет место, также могут быть записаны как Следовательно, ионизация произведения D возможна, если сумма энергии активации и энтальпии реакции превышает потенциал ионизации вида D. Начиная из этого условия должно быть возможно рассчитать концентрацию ионов от концентрации нейтральных частиц. Однако это оказывается предприятием, поскольку параметры реакции, в частности энергия активации, недостаточно хорошо известны для реакций. Более надежные результаты были получены экспериментально с помощью масс-спектропии [13, 14, 19]. Кроме того, обширные исследования с использованием ленгмюровских зондов были проведены Calcote [13, 14, 15, 16, 17, 18], а циклотронный резонанс использовался Булевичем и Падли [19]. Большинство измерений было выполнено при низких давлениях, чтобы увеличить пространственное разрешение при взятии проб из зоны реакции. Из этих измерений, в сочетании с соображениями о химической кинетике, мы знаем, что наиболее распространенными ионами в реакционной зоне пламени углеводородов

являются CHO^+ , скорее всего, образующиеся в результате реакции и H_3O^+ , который образуется из CHO^+ реакцией переноса протонов А третий ион, часто наблюдаемый в пламени с углеводородным воздухом, представляет собой C_3H^+ , который, скорее всего, образуется в результате реакции [18]. Эти три реакции вместе с реакцией рекомбинации были использованы Рейнманом и др. [19] в модели для описания тока через зазор свечи зажигания во время раннего сгорания. Химио-ионизация также может приводить к образованию отрицательных ионов. Однако никакой реакции на возможную схему еще не выявлено [18].

1.2.3 Термическая ионизация

В постпламенной зоне высокая температура подразумевает высокую кинетическую энергию частиц газа. Столкновения между этими частицами могут привести к образованию пар электронов и положительных ионов. Обратный процесс, рекомбинация, уменьшает концентрации электронов и ионов. Написав ионизацию и рекомбинацию для вида А в качестве реакции, можно получить выражение для равновесия. Поскольку все виды находятся в газовой фазе, парциальное давление является подходящей переменной для описания равновесия. Скорость прямой реакции (скорость ионизации) пропорциональна парциальному давлению видов А, p_A , тогда как обратная скорость реакции (скорость рекомбинации) пропорциональна продукту. Выраженные с точки зрения скорости потребления вида, эти отношения можно записать так же, как и $k_f(T)$, а $k_b(T)$ - зависящие от температуры константы скорости реакции. В случае равновесия оба уровня потребления равны. Это дает выражение для равновесных концентраций участвующих видов с зависящей от температуры константой равновесия $K(T)$. Традиционным способом расчета ионизационных равновесий является использование уравнения Саха. Эта полезная связь была первоначально получена для идеализированной системы невзаимодействующих атомов

водорода, протонов и электронов и использовалась в астрофизике. Тем не менее, он часто и успешно применяется к более сложным системам [17, 18]. Один из способов получения уравнения Саха состоит в том, что свободная энергия принимает минимальное значение в термодинамической системе с постоянным объемом и температурой в равновесии. Выражение связывает статистическую величину статистической функции Z , свободной от энергии $F(T; V) = U - TS$, термодинамического потенциала. В [12] дается пошаговый вывод статистической суммы. Минимизация свободной энергии показана в [13]. Результатом этой минимизации является искомая зависимость [12], которая связывает электронную плотность в газе атомов водорода с плотностью газа n и температурой. Переменная также называется тепловой длиной волны электронов и определяется в уравнении [13]. При применении этого соотношения к другим системам плотность газа n должна быть заменена плотностью вида A , являющегося доминирующим донором электронов. Так Сайцкофф и др. [17, 18], Вильстерманн [15] и Андерссон [16] адаптировали уравнение. Более гибкий метод выполнения расчетов ионизационного равновесия, особенно при участии нескольких видов, основывается на системе уравнений равновесия и уравнениях для сохранения элементов.

1.2.4 Электронное присоединение

Тенденция к нейтральной частице для захвата электрона и образования отрицательного иона описывается его электроотрицательностью. При сжигании присутствуют различные электроотрицательные виды, наиболее важным из которых является молекулярный кислород из-за его обилия. ОН-радикал, присутствующий на фронте пламени, может даже быть более важным из-за его высокой сродства к электрону. В таблице В.3 в Приложении перечислены важные электроотрицательные виды вместе с их сродством к электрону. Можно выделить три возможных типа процессов,

образующих отрицательные ионы [18]. Во-первых, существует возможность химиоионизации, о которой говорилось в разделе 1.2.2. Во-вторых, можно рассмотреть диссоциативную привязанность, то есть реакцию типа. В-третьих, наиболее заметным типом является привязка трех тел, где для сохранения энергии и импульса требуется вид М. Примером такого процесса являются Hayhurst и Kittelson [10], дающие скорости реакции для реакции (2.4), позволяющие рассчитывать концентрацию отрицательных ионов, обеспечивающую концентрации для электронов, кислорода и вида М. Предполагая условия и видовые концентрации, характерные для несгоревшего края фронта пламени, Фиалков [18] пришел к выводу, что большинство электронов прикреплены к кислороду менее чем за 30 мс. Экспериментальные результаты, полученные Goodings et al. [11] показывают, что равновесная концентрация O₂ может быть в 500 раз больше, чем концентрация электронов при 600 К в пламени, богатом топливом, и даже больше в обедненном пламени. Очевидно, что в средах, где присутствует кислород, большая часть электронов будет связана этим видом. Присоединение электрона к электроотрицательной частице в постпламенной зоне можно рассматривать как ионизационное равновесие. Написание равновесия присоединения электрона, как подчеркивает сходство с уравнением (2.2). Электронное сродство электроотрицательных видов заменяет потенциал ионизации в уравнении (A.27). Таким образом, равновесие между электронами и электроотрицательными видами, с одной стороны, и отрицательными ионами, с другой стороны, также можно описать с использованием равновесных констант $K(T)$.

1.3 Перспективы применения явления электропроводности пламени в ДВС

Обзор был посвящен идентификации физических механизмов функционирования ионизационного датчика и их взаимодействия. Цель

заключалась в том, чтобы увеличить наше понимание роли этих основных механизмов, чтобы облегчить интерпретацию сигнала датчика в приложениях. Эксперименты и симуляции, представленные в этом тезисе, были разработаны для ответа на вопросы общим образом с намерением разрешить передачу выводов в другие, зачастую более сложные среды. В дополнение к исследованиям, касающимся ионизационного датчика, в двигателе НССІ проводилась различная оптическая диагностика, а энергетическое осаждение искровых разрядов изучалось с помощью калориметрии. Все эти исследования имеют общую цель - совершенствование технологии двигателей. Исследования ионизационного датчика включают в себя одновременное измерение тока датчика и локального коэффициента эквивалентности с двумерной лазерно-индуцированной флуоресценцией, экспериментальное исследование роли контакта между пламенем и электродом для формы раннего тока, структура моделирования, которая позволяет включить эффекты электрода, анализ ионизационного равновесия в постпламенной зоне, исследование влияния потока газа на ток датчика и измерения тока, сопровождаемые одновременной визуализацией оксида азота и гидроксильные распределения как в покое, так и в турбулентном горении. Двумерная индуцированная лазером люминесценция обеспечивала информацию о локальном отношении эквивалентности близко к зазору электрода непосредственно перед зажиганием. Обнаружена сильная корреляция между интегралами как при текущих пиках, так и в отношении эквивалентности смеси во время измерений в покоящихся однородных смесях. Турбулентные гетерогенные смеси значительно ухудшили корреляцию. Кроме того, корреляция, по-видимому, ограничивается областью, которая соединяет электроды, а не, как ожидалось, с зазором электрода, что указывает на то, что ток достигает первого максимума при контакте с более крупными областями электродов. Для реализации этой идеи была проведена серия опытов. Основные выводы здесь заключались в том, что контакт между пламенем и

катодом необходим для тока во время раннего сгорания и что заряды транспортируются главным образом вдоль оболочки ядра пламени. Была разработана модель, которая подчеркивает эти процессы. Было высказано предположение, что механизмы, подобные тем, которые происходят в тлеющих разрядах, также контролируют излучение электронов с катода ионизационного датчика и действуют как узкое место для сигнала датчика ионизации. Ток при основном сгорании вызван термической ионизацией. Всестороннее исследование ионизационного равновесия в послепламенных газах включало также важные электроотрицательные виды и микроэлементы, присутствующие в атмосфере. Было показано, что щелочных следов, присутствующих в воздухе, достаточно для преобладания сигнала датчика ионизации в большинстве условий. Только при довольно высоких температурах важную роль может сыграть ранее предполагаемый основной донор электронов, оксид азота. Применение ионизационного датчика в двигателях предполагает наличие турбулентных условий. Поэтому знание о том, как поток газа влияет на ток датчика, должно поэтому считаться полезным. Пламенная визуализация на ранней стадии горения дала объяснения изменения первого пика тока от цикла к циклу. Было показано, что изменяющийся контакт между пламенем и катодом является причиной наблюдаемых в форме отклонений. Что касается второго пика, измерялось влияние потока газа на корреляцию между давлением и током. Высокие скорости потока вблизи свечи зажигания нарушали корреляцию между током и пиковым положением давления. Двумерное изображение оксида азота обеспечило еще одно средство для исследования важности этого потенциального донора электронов для сигнала датчика ионизации. Слабая корреляция между локальной концентрацией NO и анализируемым током подтвердила результаты анализа равновесия. Было обнаружено, что концентрация оксида азота и гидроксильных радикалов меньше вблизи электродов в покоящихся смесях. Причиной этого может быть охлаждение электродами. В турбулентных смесях наблюдался перенос газа с различными

концентрациями NO и OH в зазор между электродами. Связь между текущей и средней температурой газа отклонялась от температуры, наблюдаемой в покоящихся смесях. Поведение тока влияет на локальную температуру, а не на среднюю температуру, определяемую давлением. Результаты позволяют составить подробную картину датчика. Ранний сигнал датчика вызван переносом зарядов вдоль реакционной зоны. Области с более богатой смесью обладают более высокой проводимостью, вызванной химио-ионизацией. Однако фактически наблюдаемый ток контролируется контактом между проводящей зоной и катодом. Таким образом, он режет условия на фронте пламени в момент достаточного контакта с катодом. Поэтому разница в распределении топлива может приводить к изменениям первого пика тока, хотя средний состав смеси остается неизменным. Наличие газового потока приводит к случайному контакту между пламенем и электродами, вызванными деформацией и движением ядра пламени. Это вводит дополнительные вариации первого пика как по форме, так и по величине. Стены камеры сгорания - головки цилиндров, головки поршня и стенки цилиндра - обычно находятся на том же потенциале, что и катод. Когда пламя достигает стены, и контакт с анодом все еще обеспечивается, это может позволить больше тока через фронт пламени. В зависимости от формы камеры сгорания — это может привести или не привести к дополнительному отдельному пику, который в конечном итоге совпадает со вторым пиком. Термическая ионизация увеличивает проводимость постпламенных газов и приводит к пику тока, который обычно совпадает с максимумом давления. Величина этого второго пика контролируется главным образом температурой газа в зазоре электрода. Таким образом, все процессы, которые влияют на температуру газа в зазоре, также влияют на форму и величину второго токового пика. Кроме того, ток зависит от наличия доноров электронов и акцепторов. Фоновая концентрация доноров электронов, а именно щелочных металлов, присутствует в атмосфере, и она доминирует над сигналом датчика при относительно низких температурах,

например, в условиях разбавленного двигателя или в случае позднего зажигания. Поток газа в цилиндре может транспортировать газ с разной температурой или концентрацией донора электронов в зазор, что приведет к отклонению от ожидаемого соотношения между током и давлением. В приведенной выше комплексной картине несколько основополагающих выводов основаны на косвенных рассуждениях и требуют дальнейших исследований. В частности, знание о температуре местного газа оказалось ценным из-за важной роли температуры для ионизационного равновесия. Для спокойного сгорания правильная информация о температуре может быть получена при моделировании с использованием нескольких зон [15]. Поскольку тепловые потери на электродах важны, они должны быть включены в многозонную модель. Информация о температуре также может быть получена с помощью спектроскопии, например, путем зондирования популяции разных уровней молекулы или атома [13]. Этот метод также подходит для турбулентных смесей. Из разработанных экспериментов была разработана модульная система моделирования. Чтобы эта модель использовалась не только для качественной интерпретации экспериментальных результатов, она должна быть оснащена правильными модулями для важных процессов. Учитывая вывод о том, что электронная эмиссия с катода является предельным процессом для тока, подмодель для этого механизма будет очень приветствуем. Подмодель для процесса химиоионизации должна включать электроотрицательные виды, чтобы предсказать правильный ток также для постных смесей. Кроме того, информация о температуре также важна для этой модели и должна быть реализована с использованием многозонной модели.

1.4 Токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода

1.4.1 Условия образования несгоревших углеводородов в отработавших газах бензинового двигателя с промотирующими добавками водорода

Так как несгоревшие углеводороды CH является продуктом неполного сгорания, то основным фактором, количественно определяющим образование и выбросы CH является коэффициент избытка воздуха, рисунок 1.2.

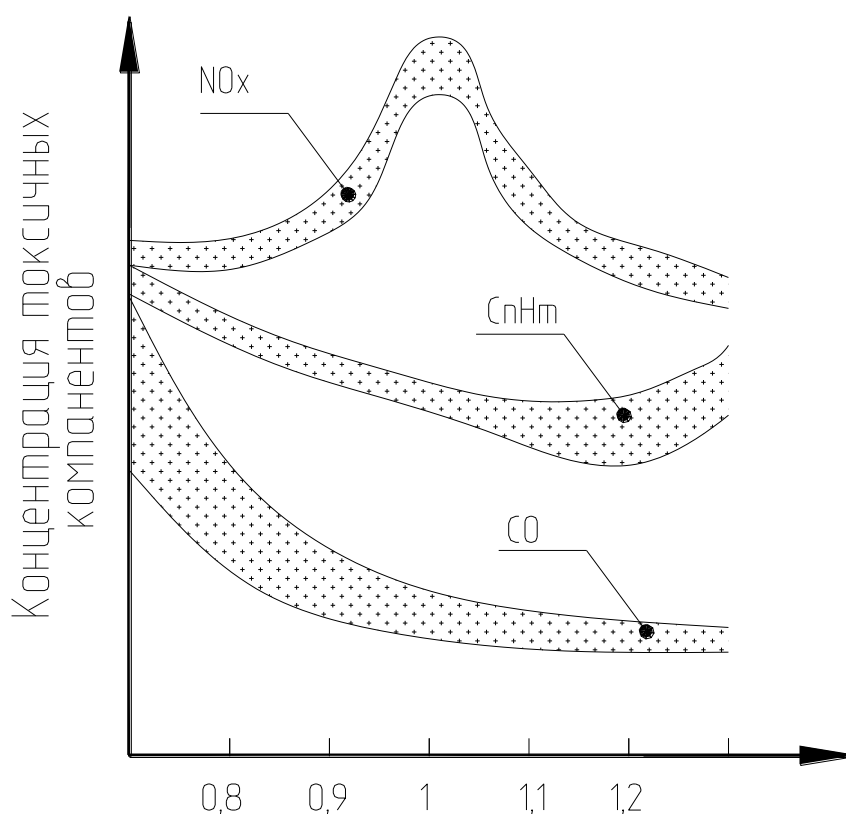


Рисунок 1.2 - Изменения концентрации токсичных компонентов от состава смеси (α).

Для уменьшения выбросов CH необходимо обеспечить коэффициент избытка воздуха несколько выше стехиометрического состава. При составах смеси $\alpha < 1$ имеет место неполнота химической реакции вследствие чего наблюдаются значительные выбросы CH .

Увеличение α более $\alpha = 1,25$ приводит к увеличению выбросов $СН$ вследствие не догорания. [5,6]

К основным механизмам образования несгоревших углеводородов относят (рисунок 1.3): 1- источник объемных $СН$ 2- замороженные слои 3- объемы гашения

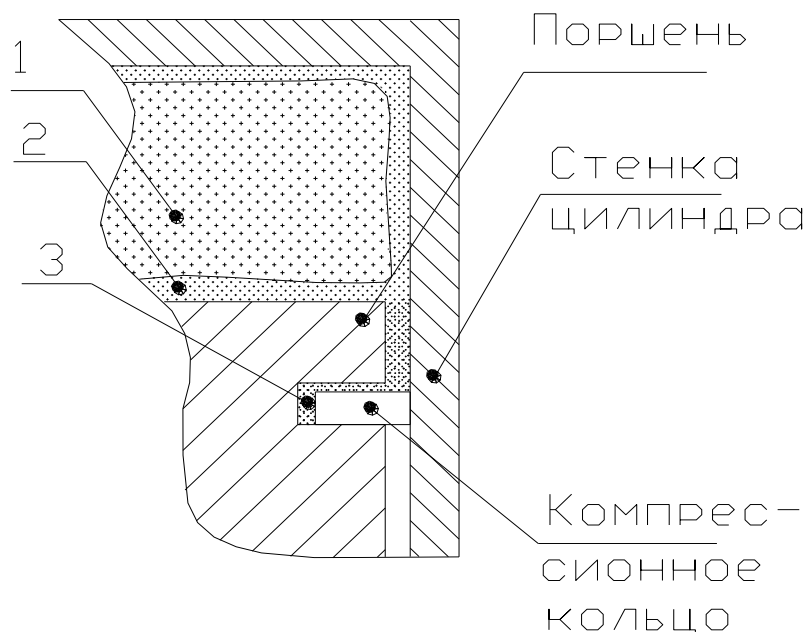


Рисунок 1.1 - Источники несгоревших углеводородов

Объемные углеводороды

Основным фактором, влияющим на образование объемных $СН$, является состав смеси, который определяется коэффициентом избытка воздуха α . Причиной образования объемных $СН$ является следствием неполноты сгорания топлива из-за отсутствия необходимого количества окислителя в ТВС. Полноту протекания процесса сгорания можно оценить коэффициентом молекулярного изменения горючей смеси μ и записать в виде:

$$\mu = M2/M1,$$

где $M1$ – количество горючей смеси, $M2$ – количество продуктов полного сгорания

Замороженные слои (Пристеночный слой)

Вблизи сравнительно холодных стенок камеры сгорания происходит гашение пламени. Это приводит к замедлению или исключению реакций горения в части смеси, находящейся в зоне гашения. основными факторами, влияющими на толщину этой зоны гашения, замороженного слоя, оказывает влияние температура и давление в момент замораживания. При температуре стенки цилиндра $T_{ст} > 100\text{C}$ количество CH , приходящееся на замороженные слои, составляет не более 5-7 %. Однако, с понижением температуры доля CH , приходящаяся на замороженные слои значительно увеличивается, например, понижение средней температуры стенки цилиндра с 190 C до 70 вдвое увеличивает концентрацию CH в ОГ.

Объемы гашения (Зазоры)

Источниками несгоревших CH являются щели, размеры которых слишком малы для распространения пламени.

Исследования показывают, что основная масса CH , образующихся в объемах гашения приходится на область 1-го поршневого кольца.

1.4.2 Известные данные о наличии взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода

Представленный обзор выполнен на основании анализа научных работ из открытых литературных источников П.В. Ивашина и А.П. Шайкина.

С целью снижения эмиссии CH за счет подбора оптимальных режимов работы двигателя, необходимо выявление закономерностей изменений концентрации CH в ОГ во взаимосвязи с изменениями амплитуды импульса ионного тока.

Изменения концентрации CH в ОГ в зависимости от состава смеси для всех изученных значений степени сжатия и скоростных режимов представлены на рисунках 1.4 и 1.5.

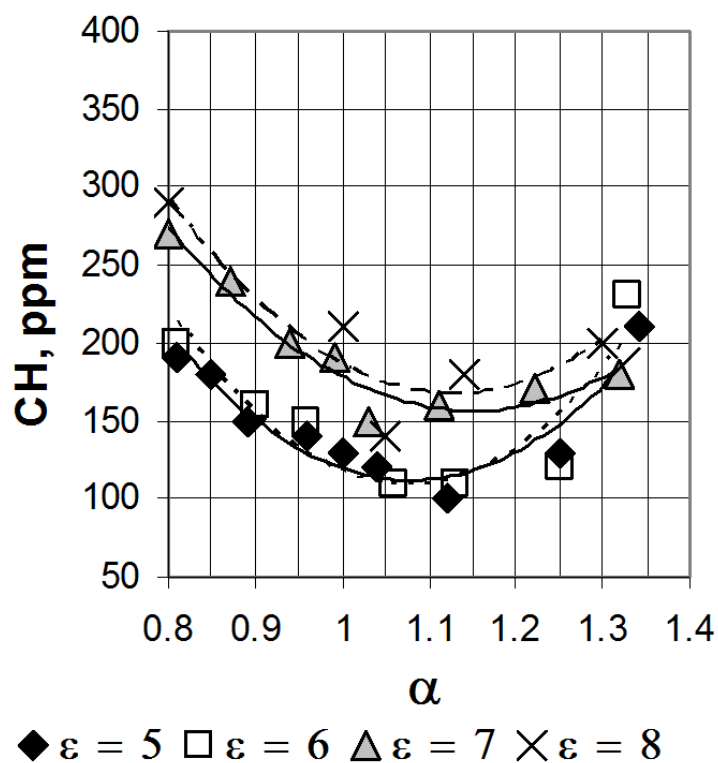


Рисунок 1.4 - Зависимость концентрации несгоревших углеводородов от состава смеси при работе УИТ - 85 на 600 об/мин

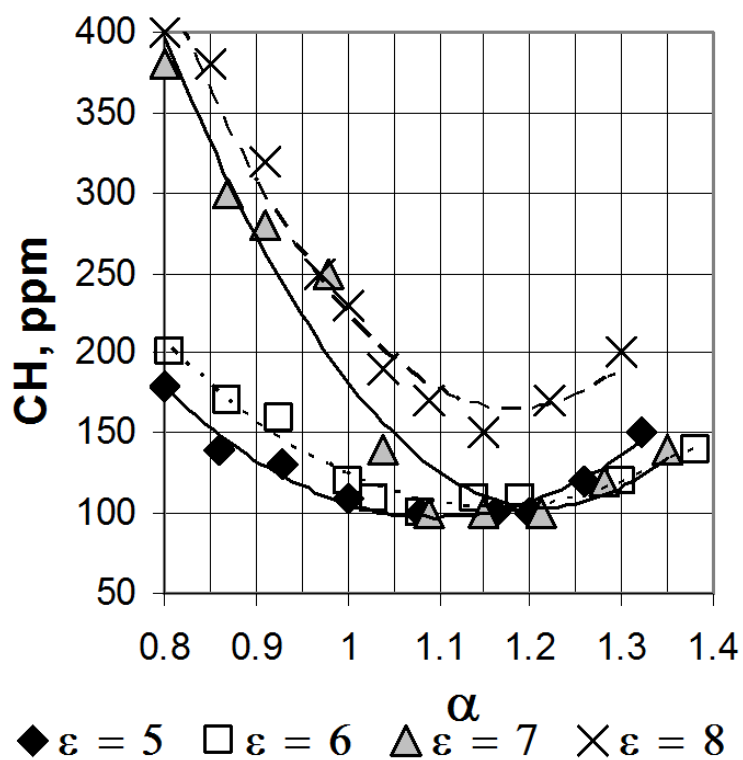


Рисунок 1.5 - Зависимость концентрации несгоревших углеводородов от состава смеси при работе УИТ - 85 на 900 об/мин.

Зависимости концентрации несгоревших СН от средних скоростей распространения пламени в основной фазе и амплитуды сигнала на ионизационном датчике представлены на рисунках 1.6 и 1.7.

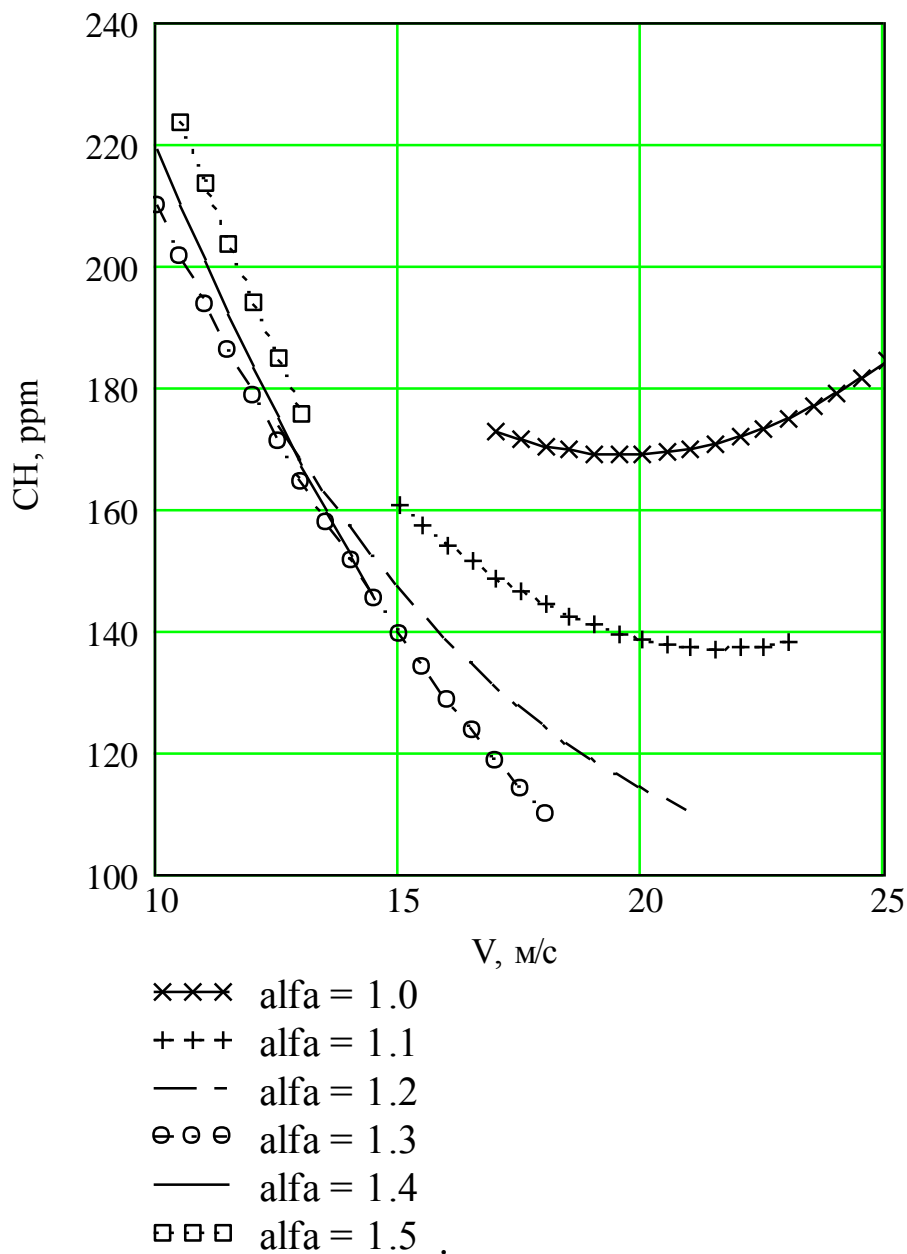


Рисунок 1.6 - Зависимость концентрации СН в ОГ от средней скорости пламени в "основной" фазе сгорания (V) для разных составов смеси при промотировании скорости сгорания добавкой водорода

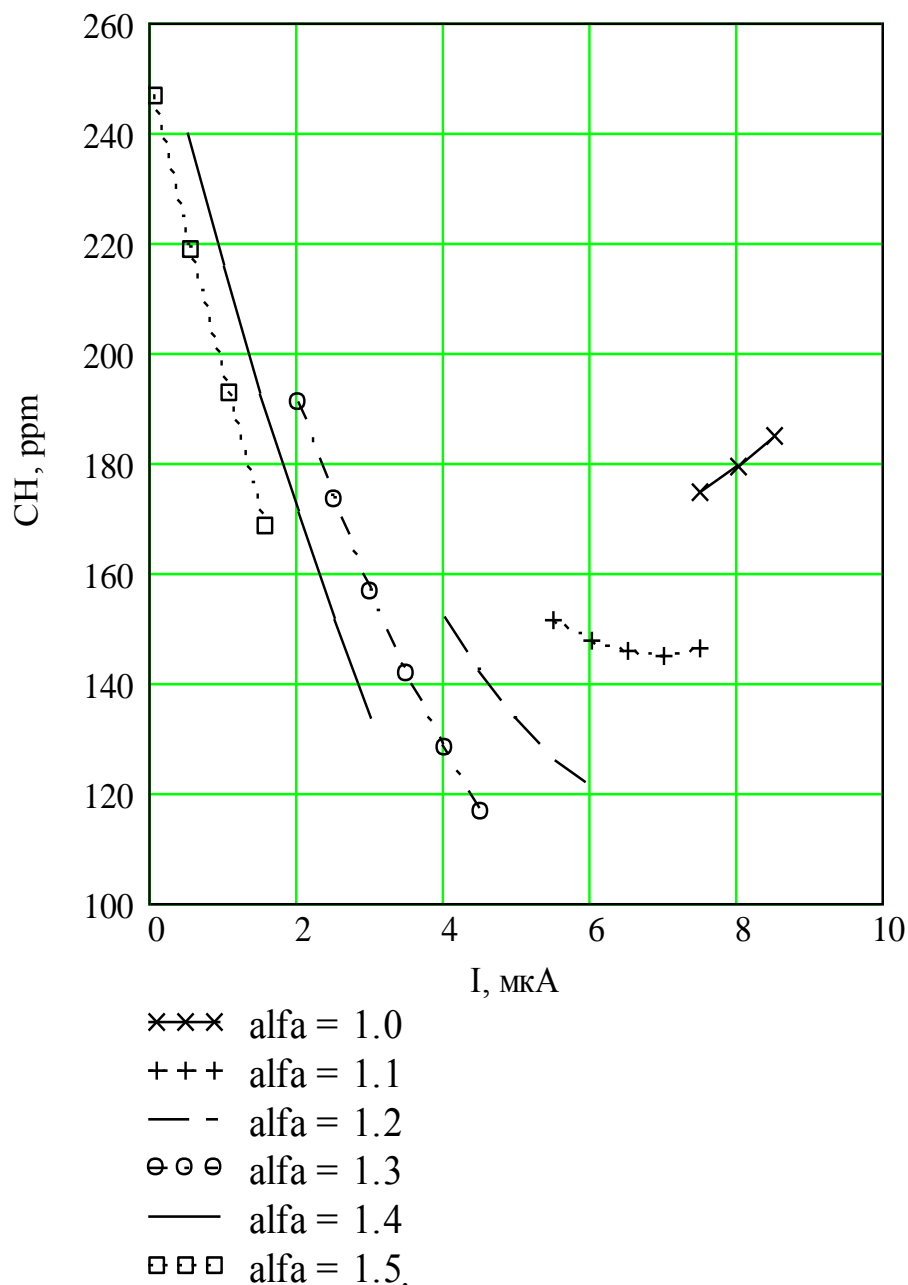


Рисунок 1.7 – Зависимость концентрации СН в ОГ от амплитуды сигнала на ионизационном датчике (I) для разных составов смеси при промотировании скорости сгорания добавкой водорода

На рисунке 1.8 представлены изменения концентрации СН в ОГ в зависимости от амплитуды приведенного сигнала на ионизационном датчике для различных значений добавок водорода Н. Анализ данной зависимости показывает, что концентрация СН в ОГ характеризуется наличием

минимума при значениях ионного тока равном около 4.5 – 5.5. Вид зависимости и значения характеристик, соответствующие минимуму СН, сохраняются примерно одинаковые при увеличении добавки водорода в ТВС, общий уровень значений при этом СН снижается. Например, пятипроцентная добавка H_2 позволяет снизить концентрацию несгоревших углеводородов в ОГ на 40%.

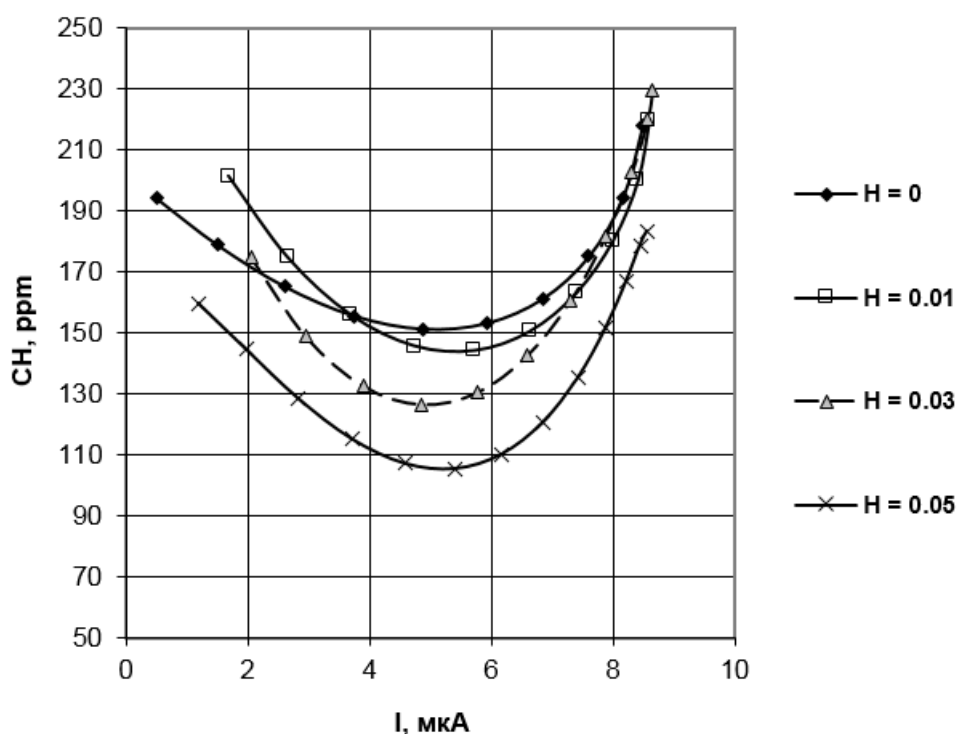


Рисунок 1.8 - Зависимость концентрации СН в ОГ от амплитуды сигнала на датчике ионизации при работе с добавками водорода в ТВС

Анализ зависимости показывает наличие минимума концентрации несгоревших углеводородов, который соответствует примерно 5 мкА. Таким образом, экспериментально выявлена взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов в ОГ и электропроводности пламени в наиболее удаленной от свечи зажигания зоне камеры сгорания.

Так как выявленная взаимосвязь представлена на данном этапе работы в виде графика сопоставления непосредственно измеряемых величин, то для дальнейшего анализа и обобщения результатов эксперимента, данная зависимость перестроена в относительных величинах, рисунок 1.9.

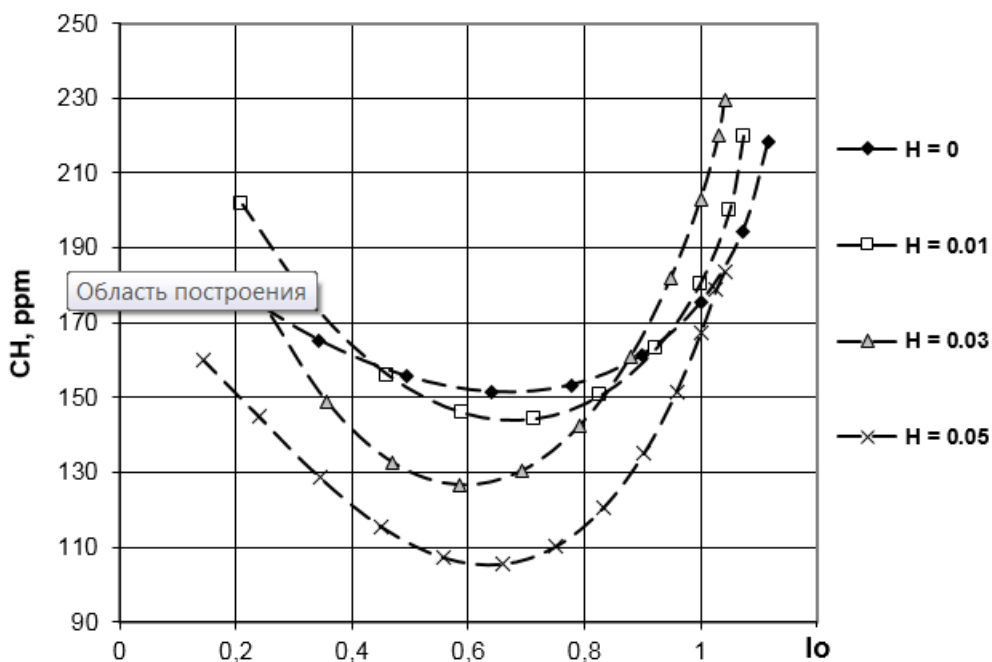


Рисунок 1.9 - Зависимость концентрации СН в ОГ от амплитуды приведенного сигнала к амплитуде сигнала при $\alpha=1$, при разных добавках водорода, для УИТ-85

То есть, за единицу приняты значения электропроводности пламени при работе на стехиометрической смеси с данной добавкой водорода в ТВС. Анализ полученной зависимости (рисунок 1.9), показывает наличие минимума концентрации СН в ОГ в области относительной величины сигнала равной примерно 0,6 – 0,7. Полученная зависимость позволяет осуществлять контроль и управление процессом сгорания по ионизационным датчикам для получения минимальной токсичности по СН в ОГ.

ГЛАВА 2 Описание экспериментальной части исследования

2.1 Экспериментальная установка

Экспериментальный комплекс (рисунок 2.1) состоит из следующих элементов:

1. Установка УИТ-85 с системами питания, охлаждения и т.д.
2. Поршень.
3. Свеча зажигания.
4. Место для установки датчиков ионизации (штатное место магнитострикционного датчика)

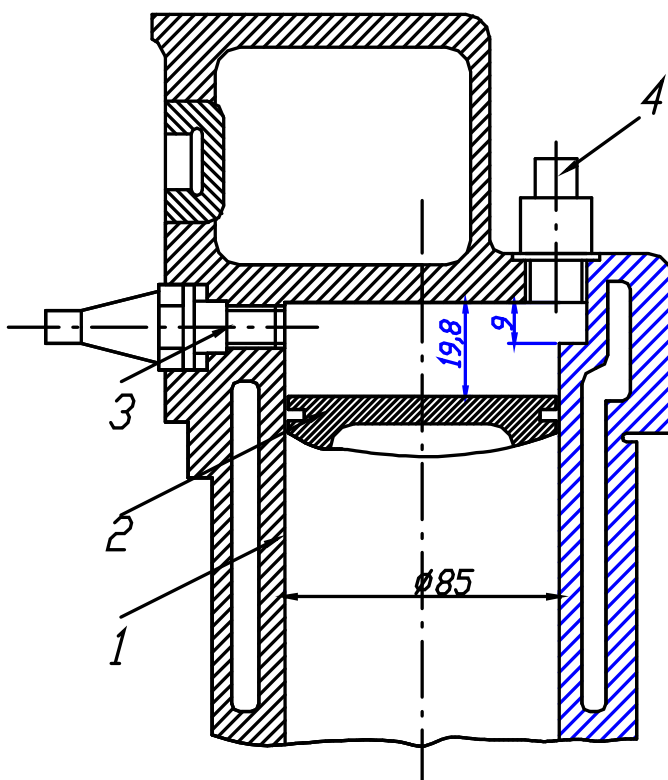


Рисунок 2.1 – Установка УИТ-85

Для исследования характеристик сгорания вместо штатного датчика детонации вмонтирован датчик ионизации, которым фиксируется импульс

тока, возникающий при соприкосновении датчика с фронтом пламени. В качестве датчика ионизации П.В. Ивашин использовал – свечу зажигания типа СД-70-3Б (рисунок 2.2).

Также в работах В.В. Смоленского и П.В. Коломийца использовался пяти электродный датчик (рисунок 2.3).

А в на рисунке 2.4 представлена характеристика цепи ионизационного зонда показывающая линейность соотношения силы тока и напряжения в цепи ионизации.

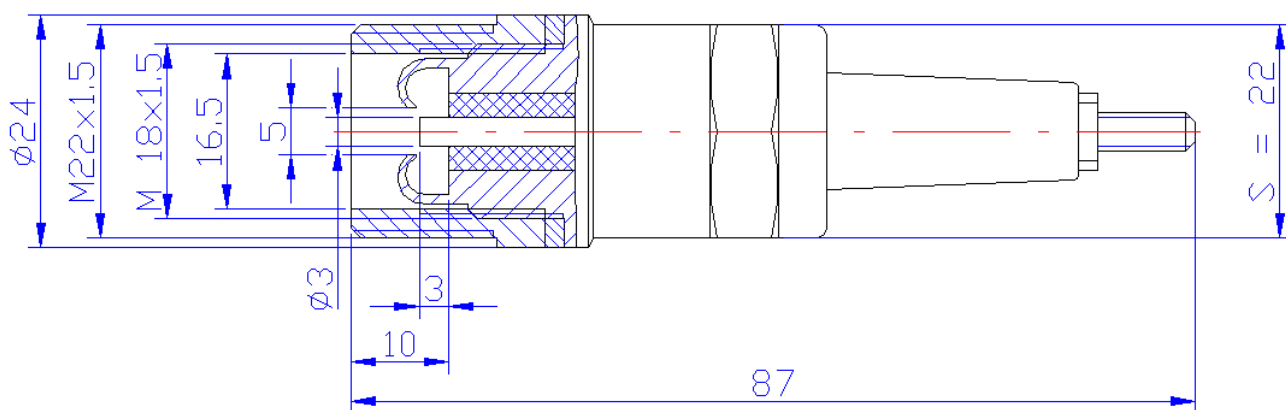


Рисунок 2.2 – Ионизационный зонд на базе свечи зажигания с переходником в сборе

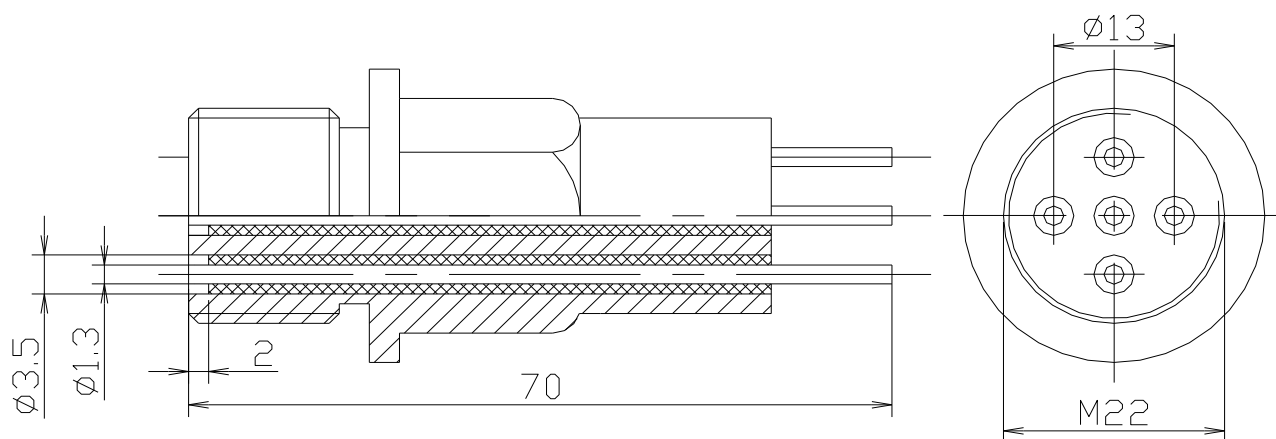


Рисунок 2.3 – Пятиэлектродный ионизационный зонд

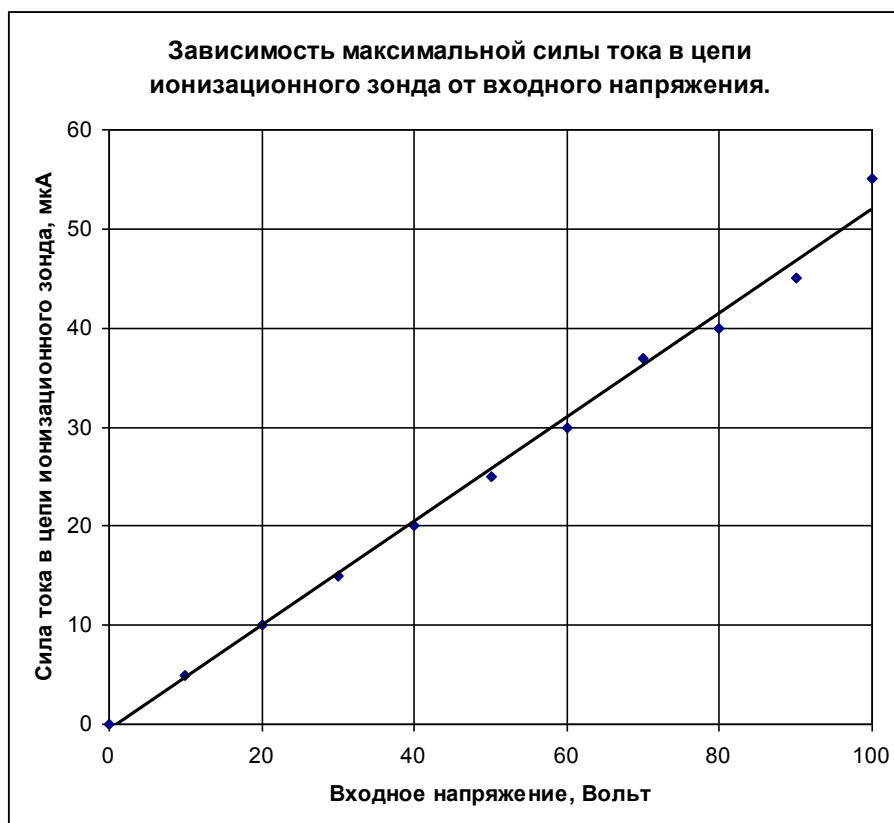


Рисунок 2.4 Характеристика цепи ионизационного зонда

Для исследования влияния малых добавок водорода в ТВС на процесс сгорания автомобильного двигателя обеспечивающего требования по токсичности на уровень выше, чем у существующих и проектируемых вновь двигателей спроектированы модели ионизационных датчиков, устанавливаемых в головку блока двигателя автомобиля. Определены места установки датчиков для получения максимальной информации о протекании процесса сгорания и собраны экспериментальные установки рисунки 2.5 и 2.6.

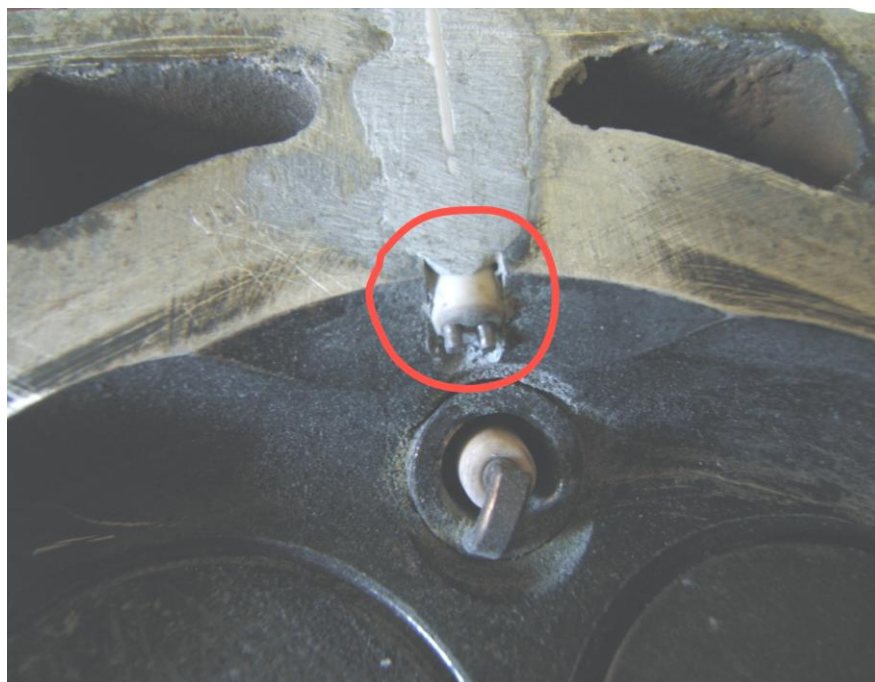


Рисунок 2.5 – Датчики ионизации расположенный в головке блока двигателя около свечи зажигания

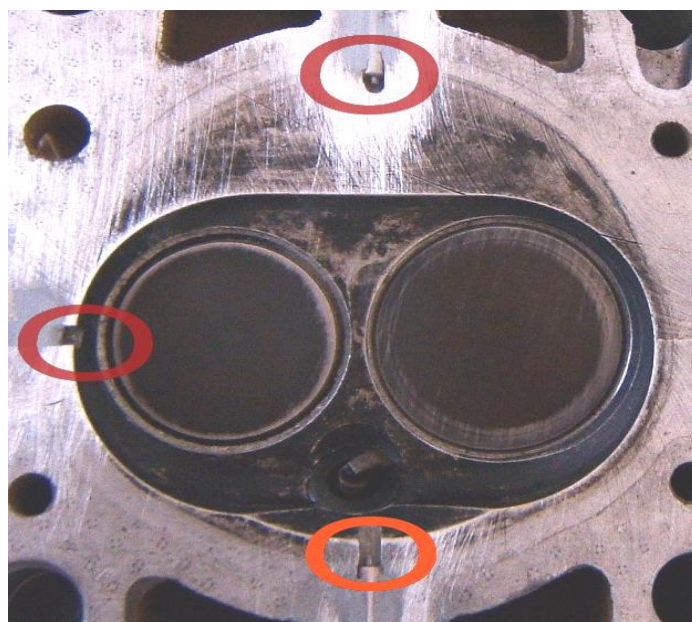


Рисунок 2.6 - Расположение датчиков ионизации в камере сгорания ДВС

Для записи осциллограмм ионного тока с датчиков ионизации использовался многоканальный АЦП Е-440 и L-783М фирмы “L-Card”. Схема экспериментального комплекса показана на рисунке 2.7.

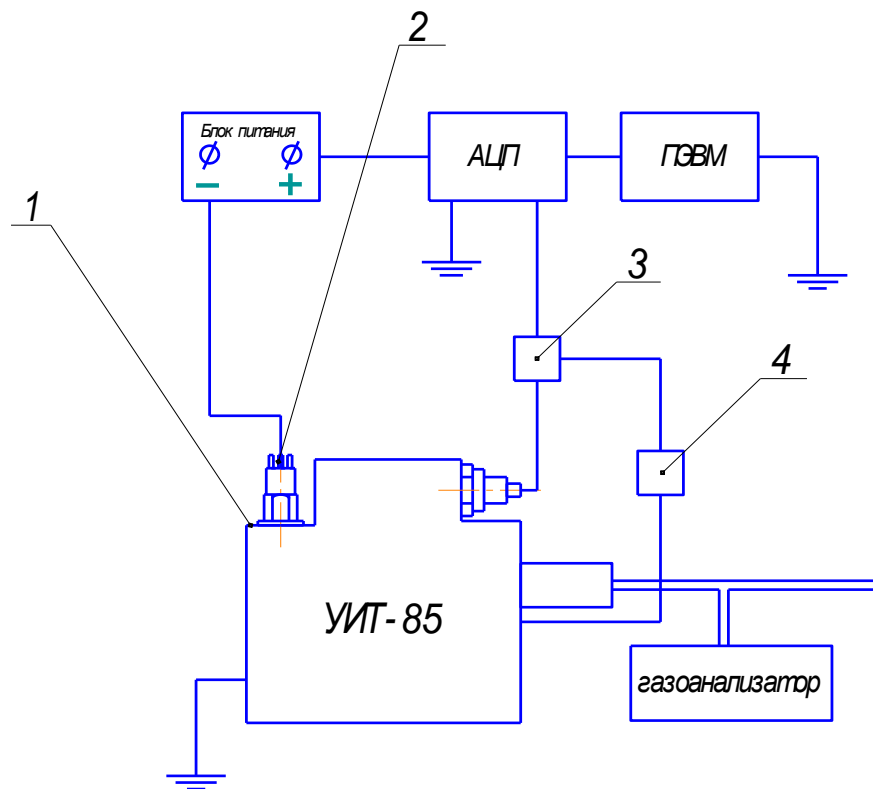


Рисунок 2.7 – Схема экспериментального стенда с одноцилиндровой установкой

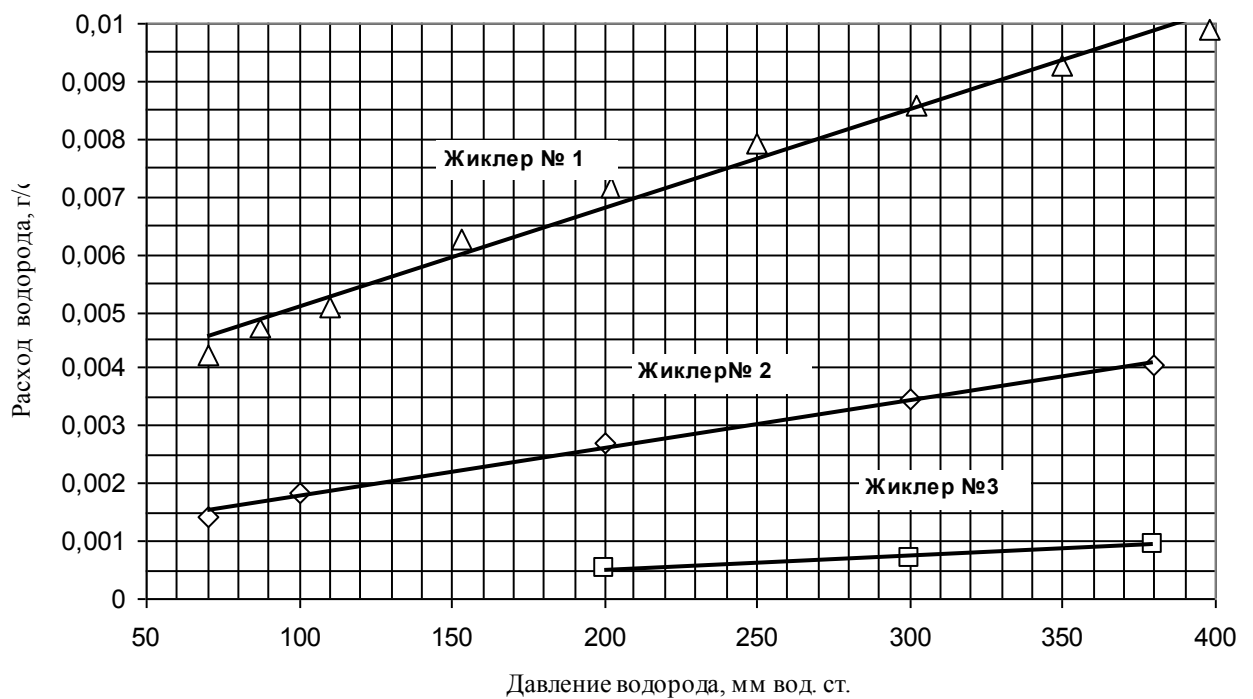


Рисунок 2.8 – Тарировочный график расходных характеристик водородных жиклеров

Для планирования значений давления водорода в эксперименте построены зависимости расходов водорода от давления в системе для трёх используемых водородных жиклеров (рисунок 2.8).

2.2 Построение модели для моделирования влияния топлива на токсичность отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода

Трансформация специалиста с развитием вычислительных технологий особенно заметна на студентах. Тот факт, что любой современный студент с применением известных CFD-кодов может решать сегодня задачу курсового проекта на уровне, достаточном лет 20 назад для диссертации. Также обязательно нужно знать фундаментальные основы, гипотезы, математические модели, заложенные в используемых им программных продуктах. Это прежде всего требуется для правильного толкования полученных результатов.

2.2.1 Создание четырехцилиндровой модели на основе одноцилиндровой

В одноцилиндровой модели в настоящее время есть Ambient – узлы с обоих концов, называемые Intake и Exhaust. Мы не должны включать их при репликации сети двигателя. Отсоединяем эти узлы с обоих концов, соединения можно отделить и отодвинуть в сторону. Нажимаем на место соединения с элементом, и средней кнопкой мыши оттаскиваем в сторону. Сеть цилиндров двигателя с присоединенными воздуховодами, представляющими впускные и выпускные отверстия, идентична для всех четырех цилиндров в двигателе. Поэтому мы можем копировать и вставлять существующую одноцилиндровую сеть три раза, чтобы создать другие цилиндры в нашем 4-цилиндровом двигателе. Используя левую

кнопку мыши, рисуем коробку вокруг каналов и сети цилиндров двигателя, чтобы выбрать всю систему. Нажимаем кнопку Copy на панели инструментов. Затем нажимаем кнопку Paste на панели инструментов, и указатель мыши станет значком перекрестия. Нажмите на холст под узлом cyl1 и создаём дублируемую сеть. Повторяем ту же операцию еще два раза (рисунок 2.9).

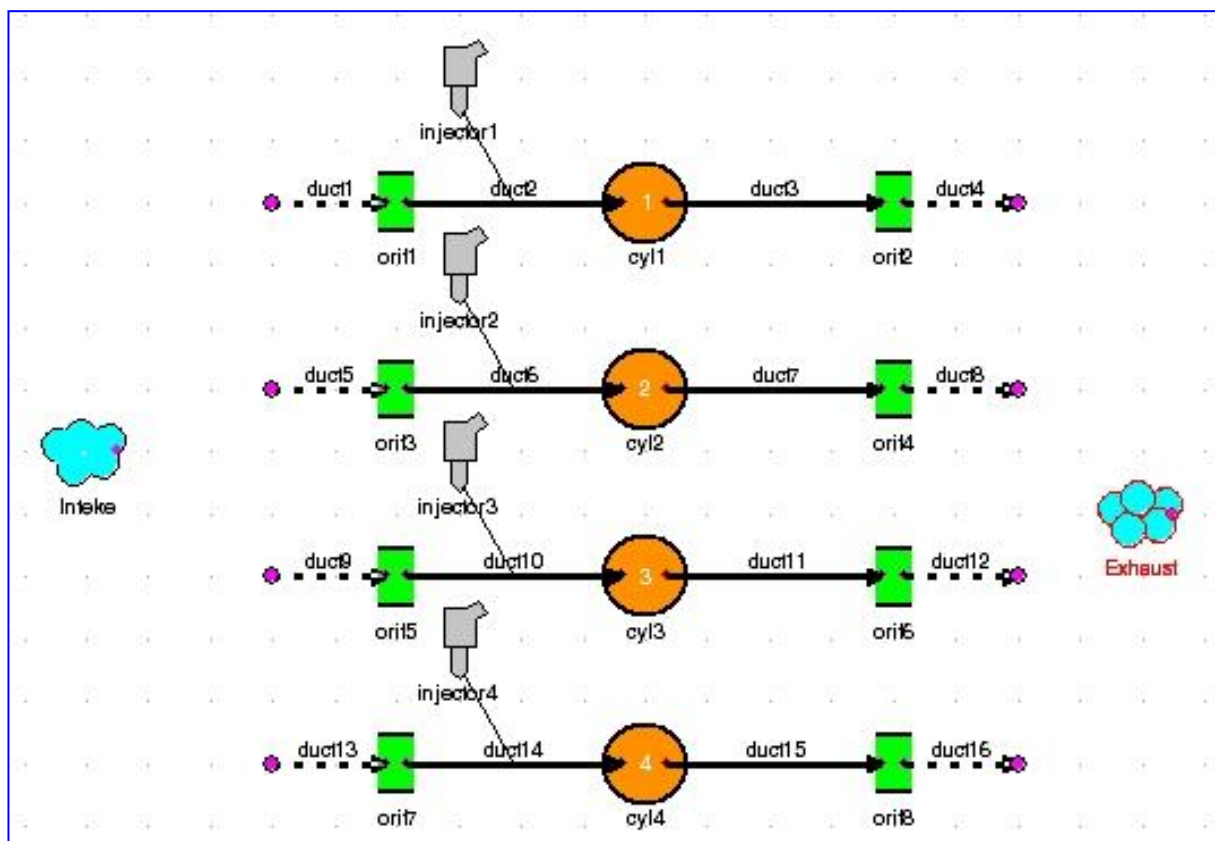


Рисунок 2.9 – Копирование и вставка модели с одним цилиндром

Добавление значка блока двигателя к холсту обеспечит прямой доступ к общей панели Engine General Pane, а также позволяет выбирать щелчок правой кнопкой мыши для добавления графиков и другие приложения.

Выбираем параметр Create Engine на главной панели в пункте Tools и открываем. Открывается панель отображающее текущие значения на общей панели двигателя и значения по умолчанию для геометрии цилиндров. В настоящее время в двигателе есть только один цилиндр - это необходимо обновить, чтобы отразить, что добавлены три новых цилиндра. Меняем

значение в текстовом поле No. of Cylinders на 4 и нажмите клавишу Enter. Таблица Firing Order автоматически вычисляет время TDC (BMT) для каждого цилиндра на основании значения количества цилиндров и выбора штрихов на цикл (TDC рассчитываются для чётных интервалов обжига и относятся к предыдущему цилиндру, а первый цилиндр зажигания под углом поворота 0). Изменяем порядок работы, чтобы он соответствовал стандартным 4-цилиндровым двигателям - 1, 3, 4, 2. Далее вносим параметры цилиндра из исходных данных и нажимаем ОК (Рисунок 2.10).

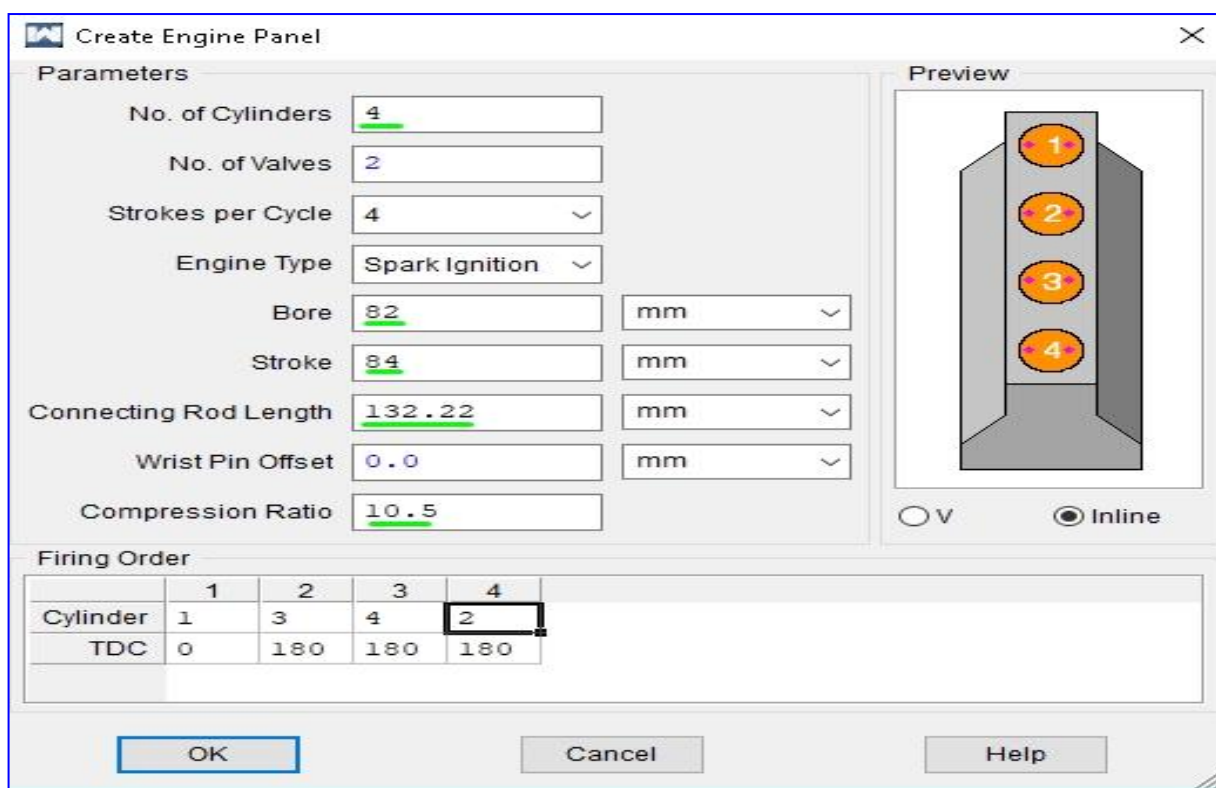


Рисунок 2.10 – Вносим параметры цилиндра из исходных данных

Созданный блок двигателя, будет иметь четыре цилиндра, созданных вместе с ним по умолчанию. Удерживая шифт выделяем левой кнопкой мыши эти цилиндры и нажимаем клавишу «Del», чтобы удалить их, оставив пустой значок блока двигателя. Перемещаем значок блока двигателя на цилиндры двигателя, щелкнув средней кнопкой по значку и перетаскивая. Цилиндры перетаскиваем в блок двигателя они защёлкнутся на значке и будут связаны с иконкой с этого момента. Расстояние между отверстиями

значка блока двигателя можно отрегулировать, щелкнув правой кнопкой мыши значок и выбрав Appearance в меню. Интервал между сетями WaveBuild равен 40 / квадратным, поэтому, располагаем цилиндры на расстоянии 3 квадрата сетки, интервал 120 (Рисунок 2.11). Получается такая схема (Рисунок 2.12).

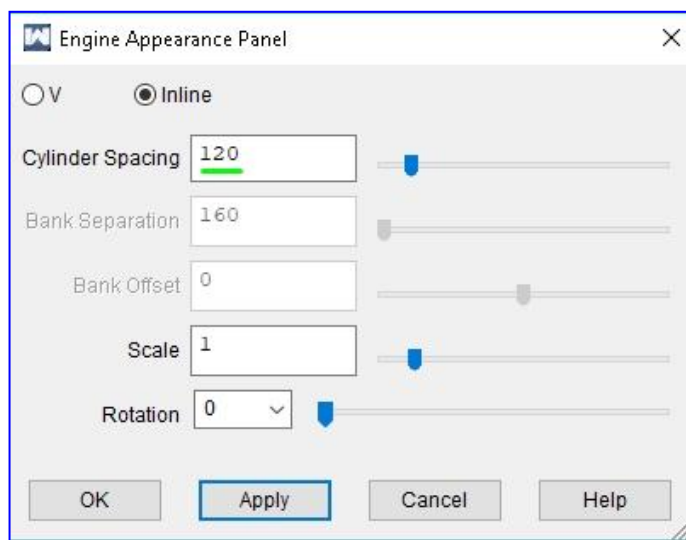


Рисунок 2.11 – Располагаем цилиндры на расстоянии 3 квадрата сетки, интервал 120

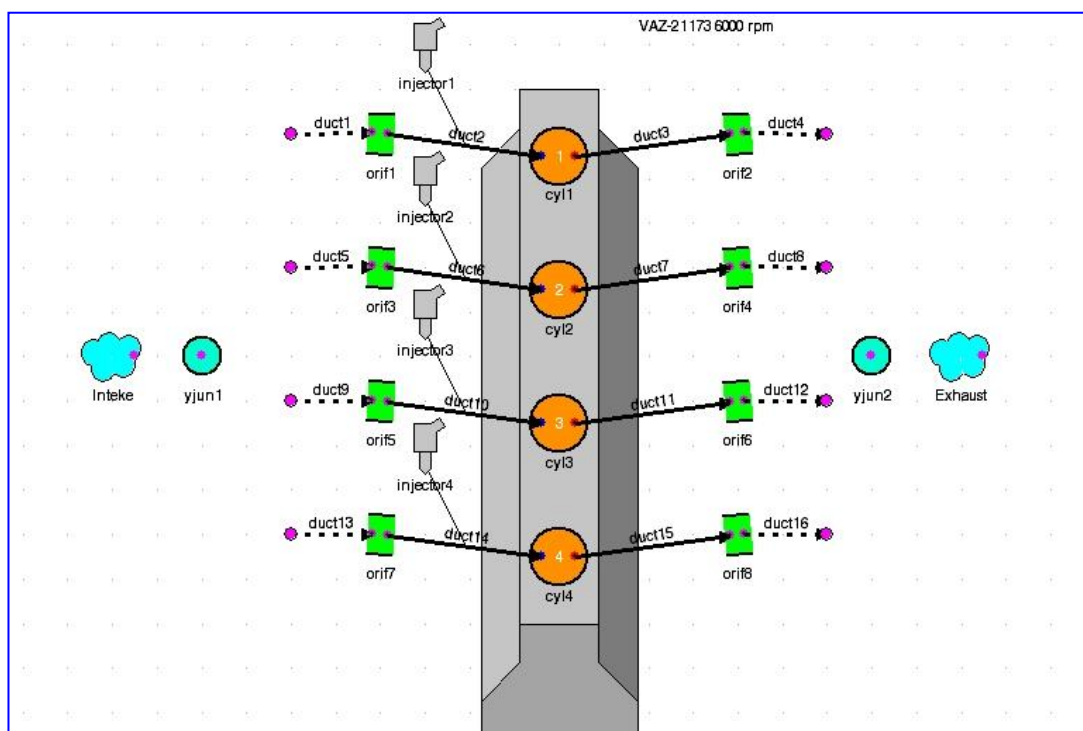


Рисунок 2.12 – Схема созданного блока двигателя

Простой Y-переход будет использоваться для соединения всех четырех цилиндров двигателя вместе с впускными отверстиями. Это будет представлять собой большую сферическую камеру с одной впускной трубой, которая будет соединяться с существующим впускным коллектором. То же самое будет смоделировано на стороне выхлопа.

Y-junctions используются везде, где необходимо смоделировать том, который имеет более одной точки подключения.

Существует два разных Y-перехода: простой и сложный. Простой Y-переход считается сферическим по форме и требует минимального ввода - диаметр определяет объем, площадь поверхности и характерные значения расхода, необходимые для соединения. Сложные Y-соединения более гибкие, но также требуют большего количества данных. Они используются для определения желаемой произвольной формы. В учебных целях мы будем использовать простые Y-соединения для подключения цилиндров к одному впускному элементу и одному выхлопному элементу.

Перенесём два элемента Simple Y-junction  из древа элементов Elements на холст (рисунок 2.13).

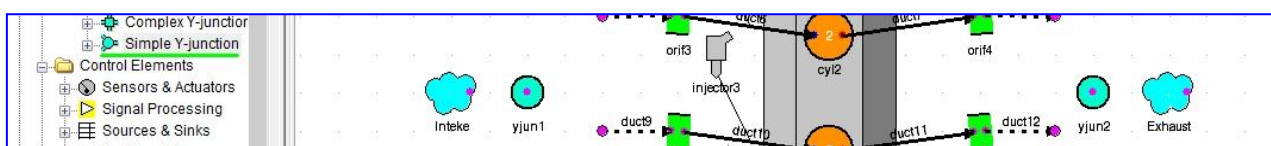


Рисунок 2.13 – Используем простые Y-соединения для подключения цилиндров к одному впускному элементу и одному выхлопному элементу

Соединяем наши оборванные концы воздухопроводов с Y-переходами путём перетаскивания оборванных концов воздухопроводов на переходник. Впускные воздухопроводы - с одним переходником, выпускные – с другим.

Создаём новый канал между окружающей средой и простым Y-соединением со стороны впуска. Вводим 50 [мм] для левого и правого диаметров и 500 [мм] для общей длины. Длина дискретизации 35 [мм]. Для

этого канала подходят начальные условия по умолчанию. Теперь создаём еще один новый канал между простым Y-соединением и окружающей средой выхлопных газов. Вводим 50 [мм] для левого и правого диаметров и 500 [мм] для общей длины, 40 [мм] для длины дискретизации. Соответствующие начальные условия: 1.05 [бар] Pressure, 700 [K] Temperature и 650 [K] Wall temperature. По завершении получается такая модель (рисунок 2.14).

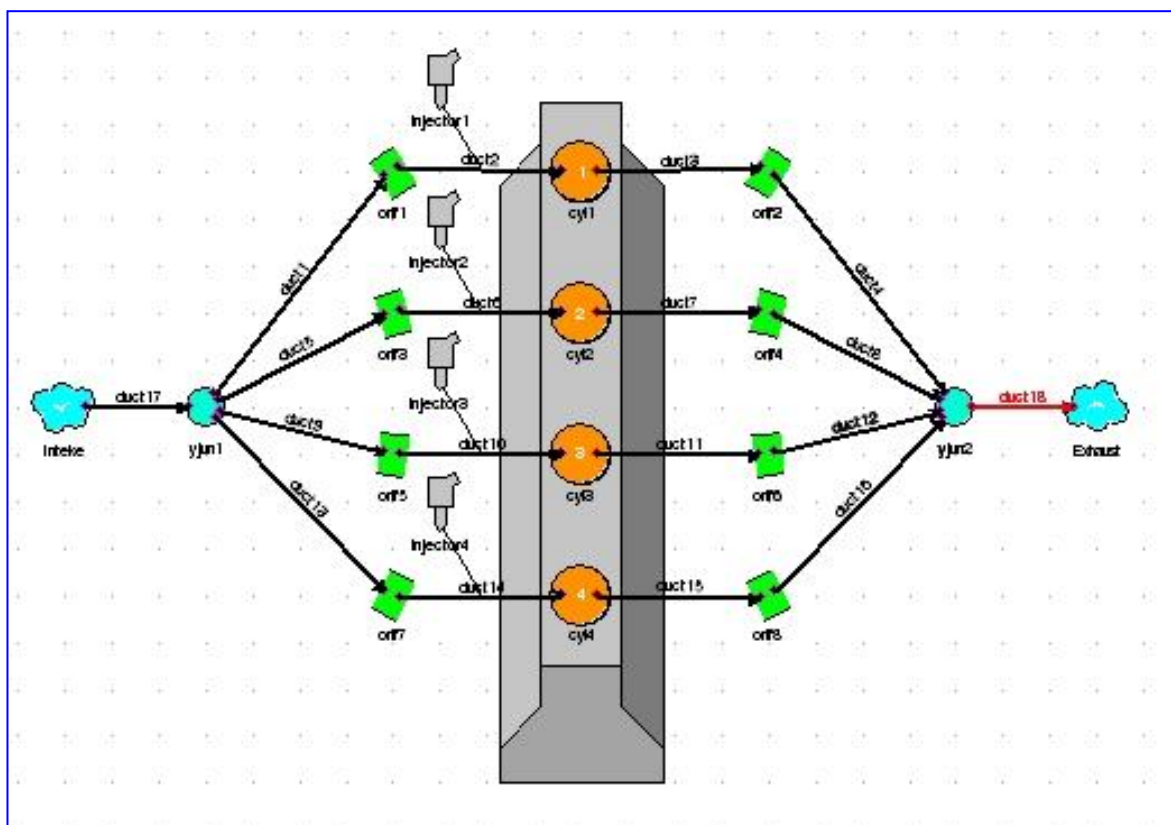


Рисунок 2.14 – Модель для расчета двигателя

Простые Y-соединения должны быть полностью определены до запуска модели. Мы должны задать геометрию перехода, а также ориентацию для всех подключенных каналов.

Дважды нажимаем на Y-переходе на входе, чтобы открыть панель Y-переходов. В текстовом поле Diameter вводим значение 50 [мм]. Коэффициенты по умолчанию и начальные условия подходят для нашей модели (Рисунок 2.15).

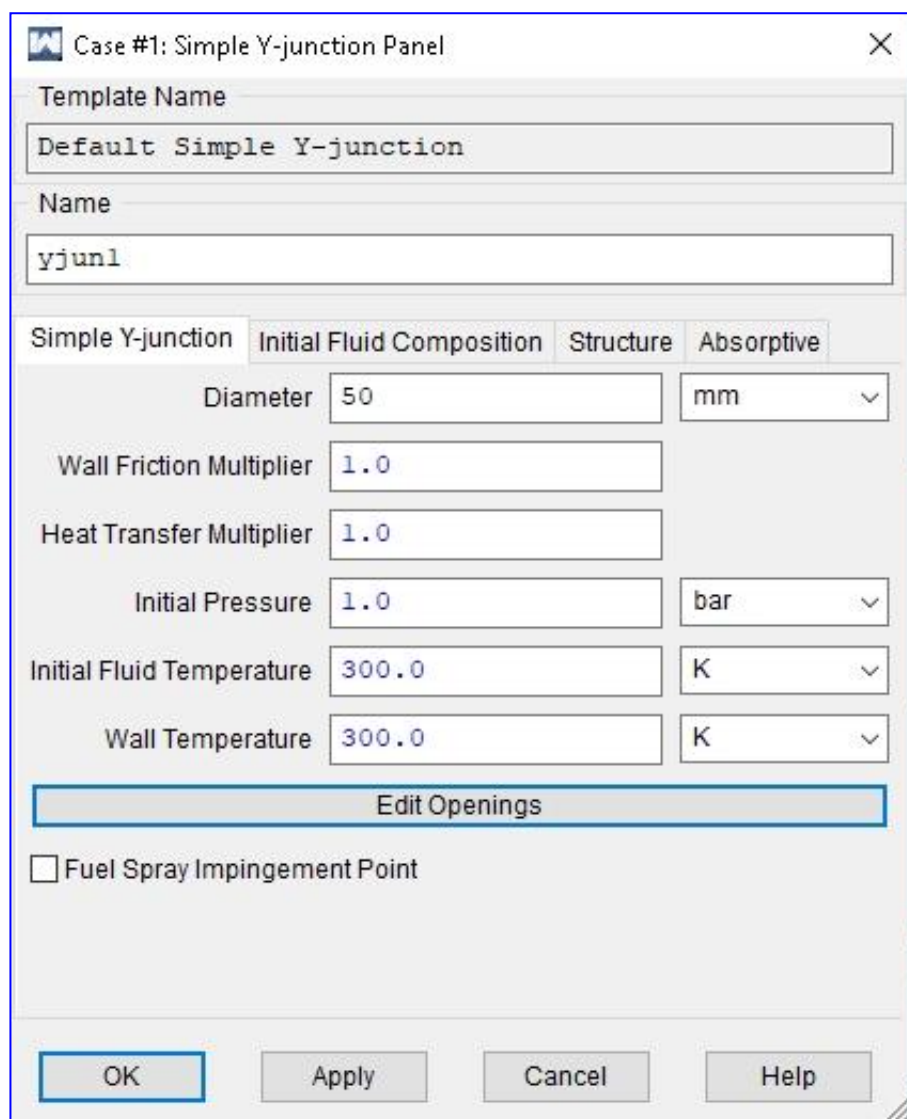


Рисунок 2.15 – Коэффициенты по умолчанию и начальные условия для нашей модели

Теперь нажимаем на кнопку Edit Openings, чтобы сориентировать каналы для каждого присоединённого воздуховода ориентация должна быть задана с использованием трёх углов для описания положения канала относительно осей X, Y и Z. Если введённые значения для этих углов не суммируются правильно (т. Е. Определённые углы геометрически невозможно сориентировать канал в трёхмерном пространстве), все три поля будут красными, чтобы указать на ошибку. После исправления поля снова станут зелёными. Заполняем таблицу как показано на рисунке 2.16.

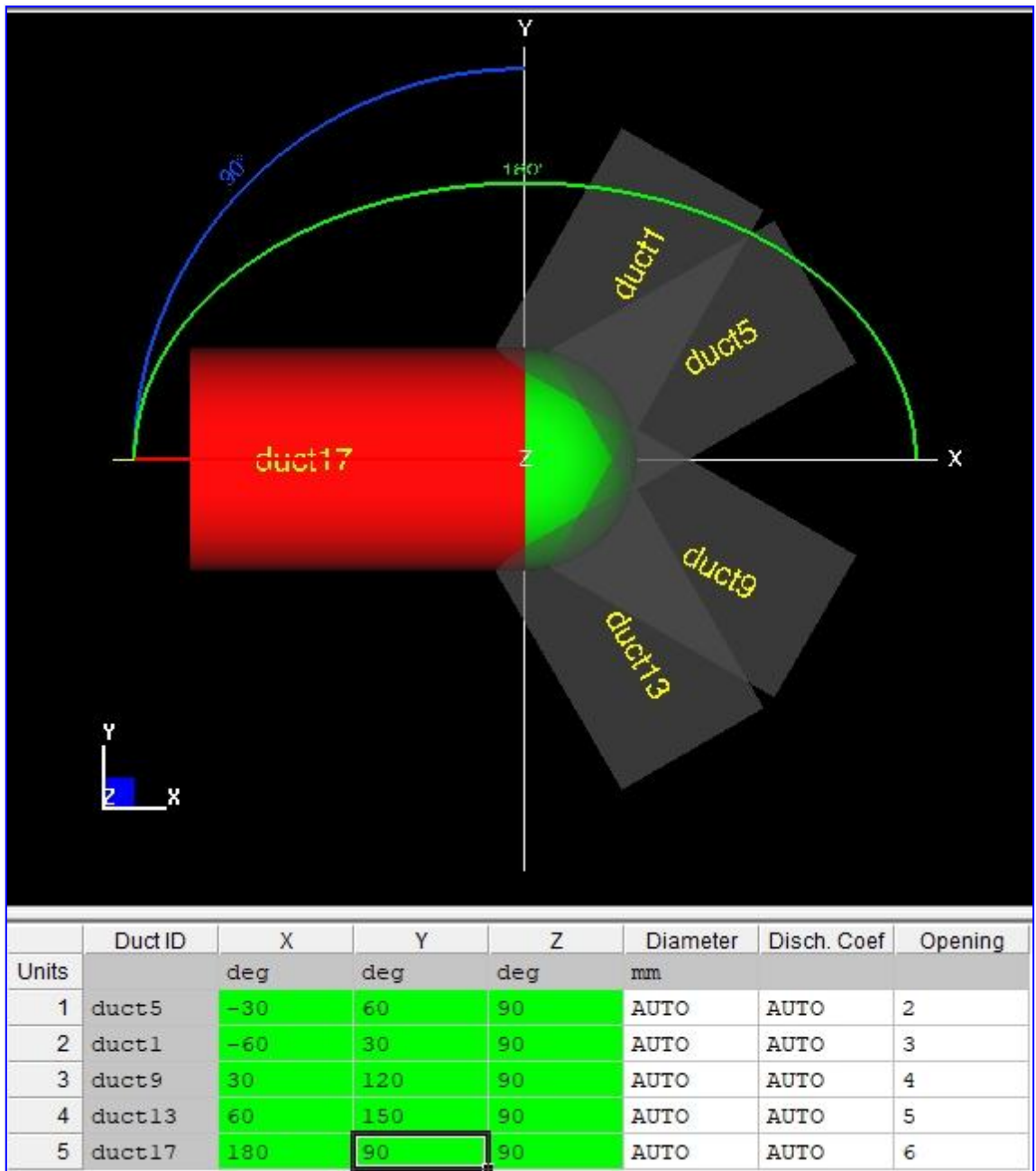


Рисунок 2.16 – Ориентация должна быть задана с использованием трёх углов для описания положения канала относительно осей X, Y и Z.

Простой Y-переход на стороне выхлопа устанавливаем аналогичным образом с диаметром 50 мм и Давление 1,05 бар, Температура 700 [K] и Температура стенки 650 [K]. Ориентация воздуховодов должна быть аналогична ориентации на холсте, как на Y-переходе на входе (Рисунок 2.17 и рисунок 2.18).

Case #1: Simple Y-junction Panel

Template Name
Default Simple Y-junction

Name
yjun2

Simple Y-junction Initial Fluid Composition Structure Absorptive

Diameter 50 mm

Wall Friction Multiplier 1.0

Heat Transfer Multiplier 1.0

Initial Pressure 1.05 bar

Initial Fluid Temperature 700 K

Wall Temperature 650 K

Edit Openings

Fuel Spray Impingement Point

Рисунок 2.17 – Параметры Y-переход на стороне выхлопа

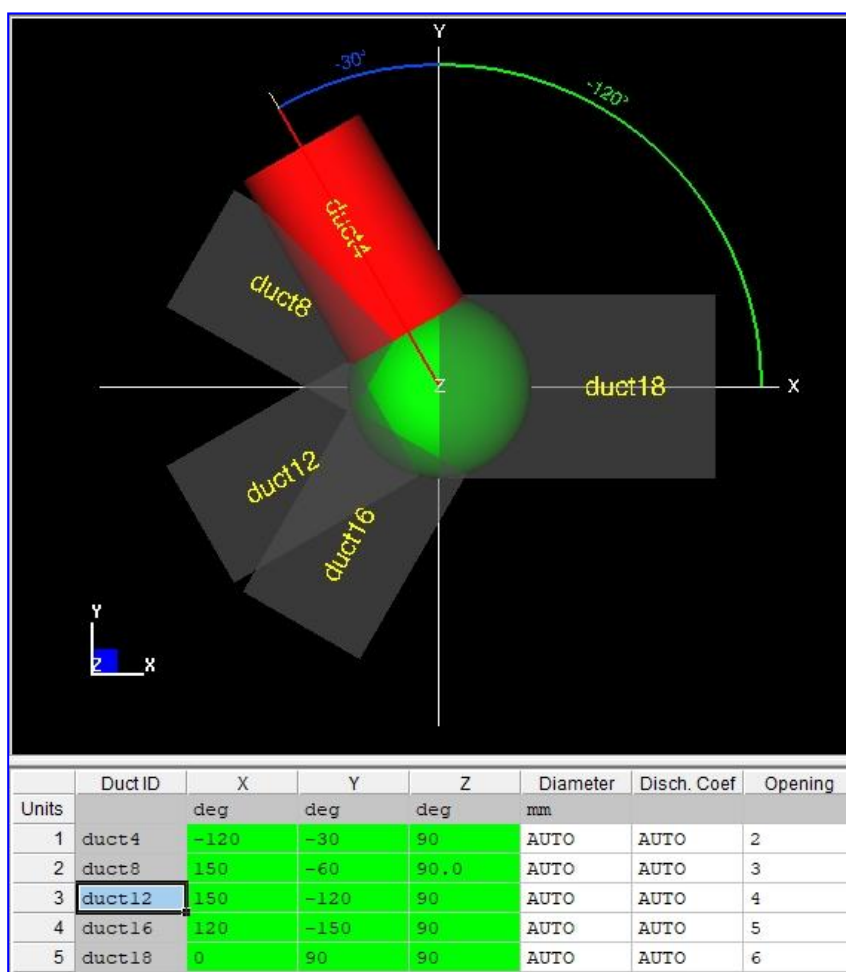


Рисунок 2.18 – Ориентация Y-переход на стороне выхлопа.

2.2.2 Графики с результатами имитационного моделирования

На рисунках 219 – 2.25 представлены результаты имитационного моделирования влияния частоты вращения на токсичность бензинового двигателя.

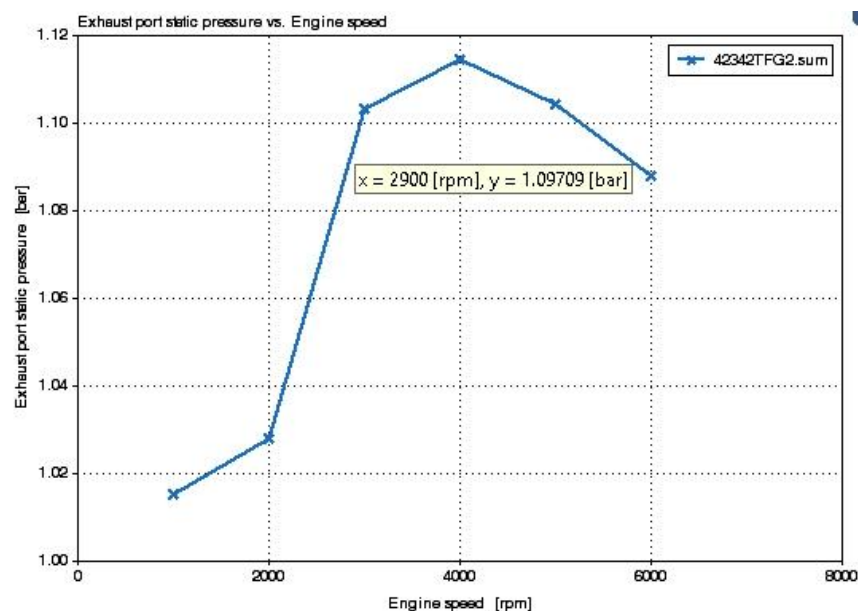


Рисунок 2.19 – Статическое давление на выпускном клапане при изменении частоты вращения

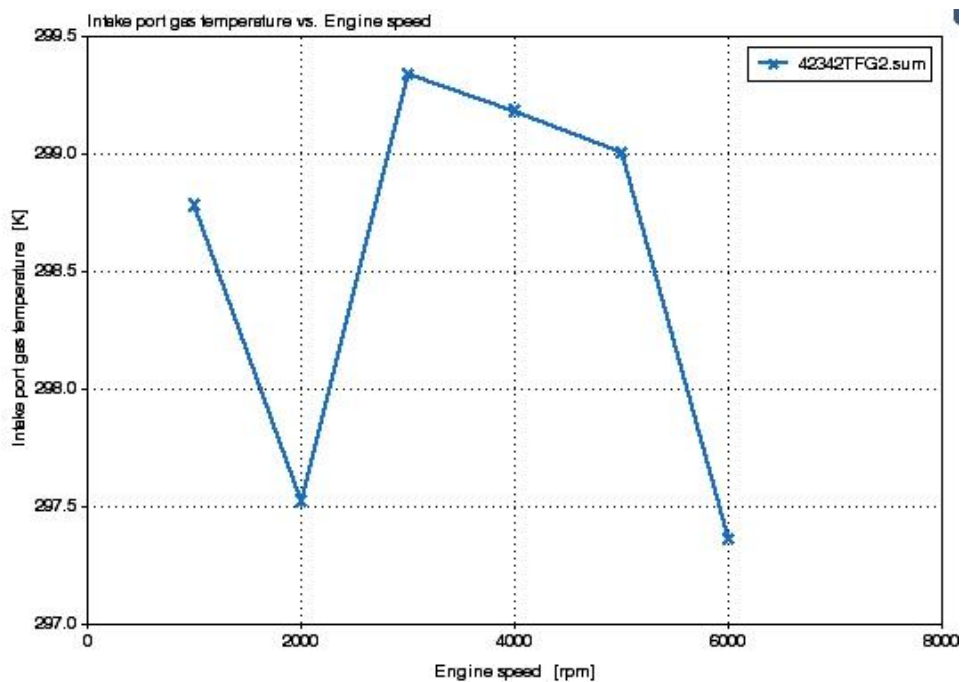


Рисунок 2.20 – Температура впускных газов при изменении частоты вращения

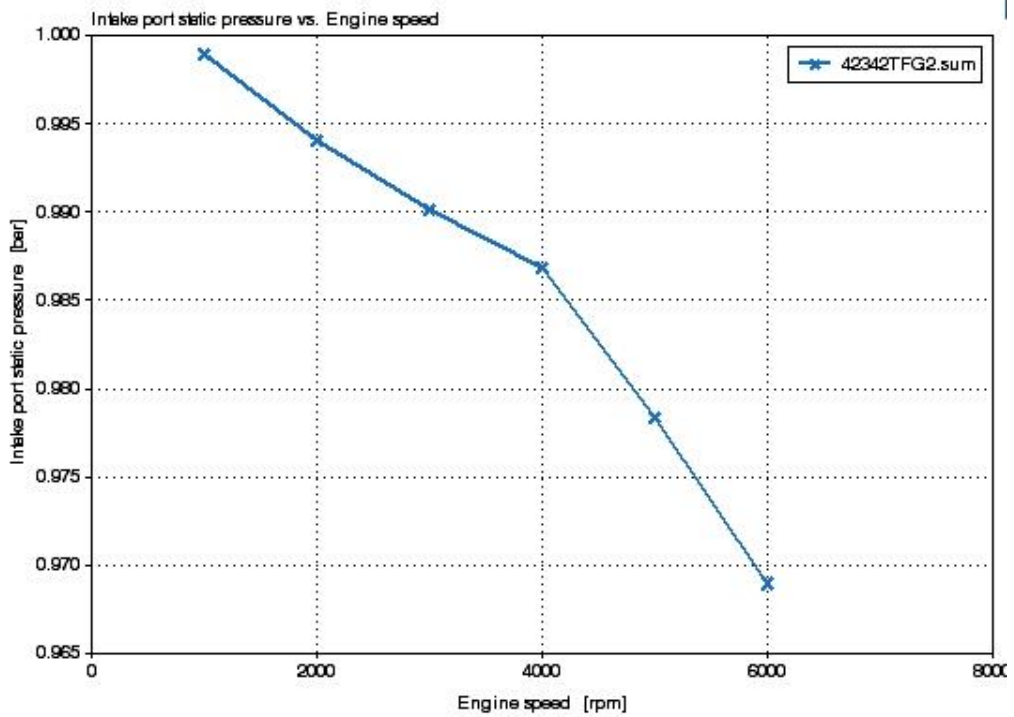


Рисунок 2.21 – Статическое давление на впуске при изменении частоты вращения.

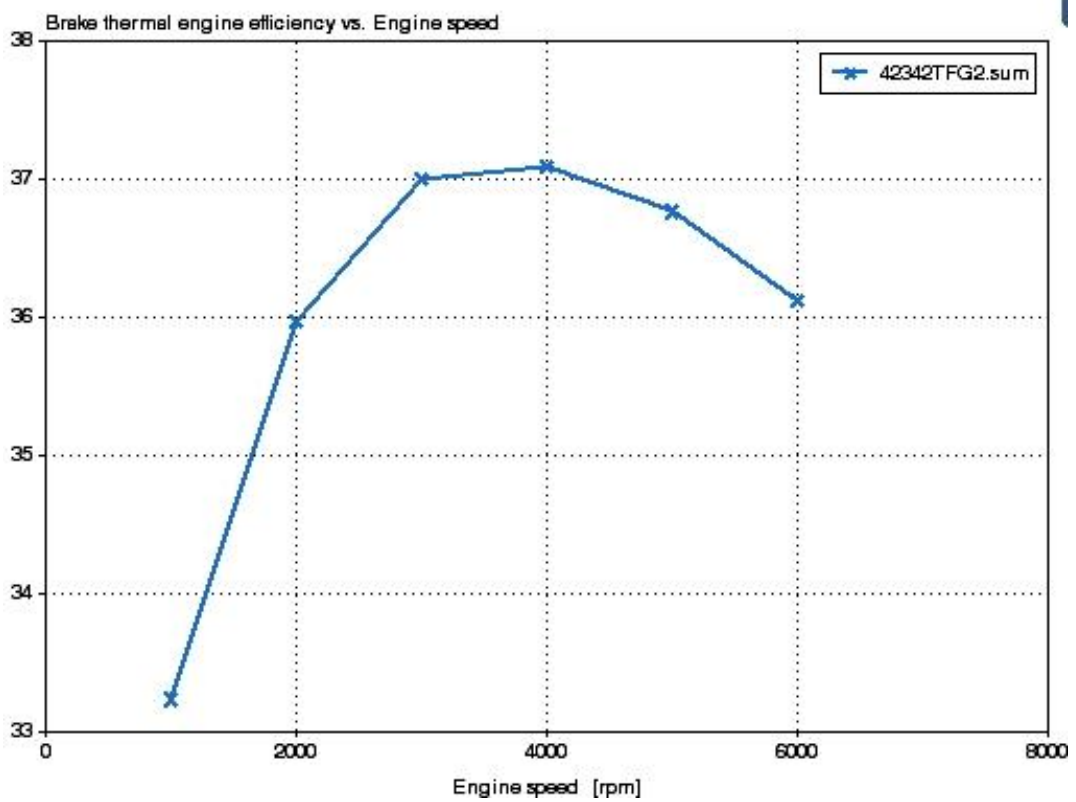


Рисунок 2.22 – Эффективный КПД двигателя в % при изменении частоты вращения

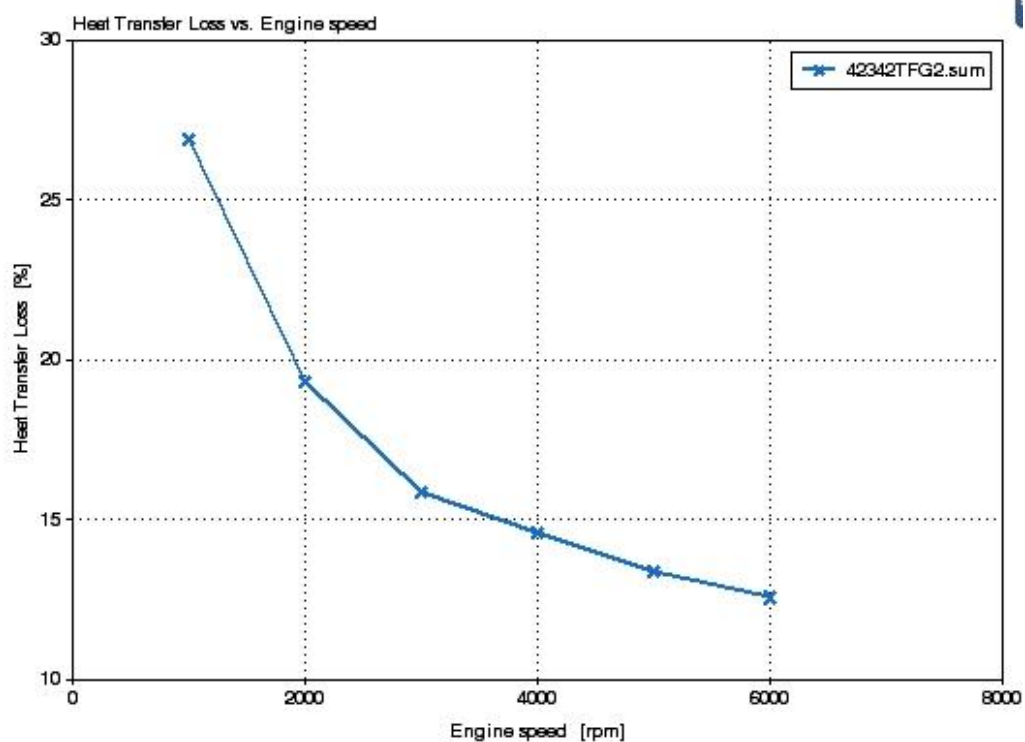


Рисунок 2.23 – Потери тепла в систему охлаждения при изменении частоты вращения

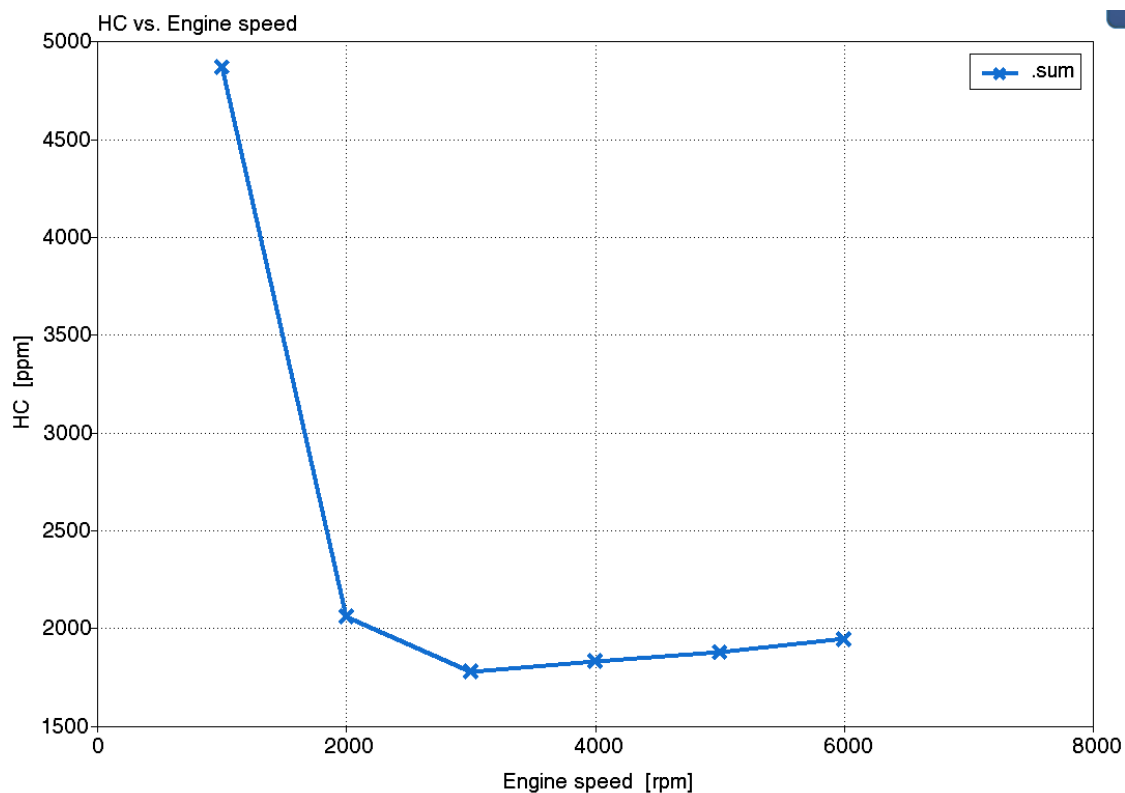


Рисунок 2.24 – Токсичность по несгоревшим углеводородам при изменении частоты вращения

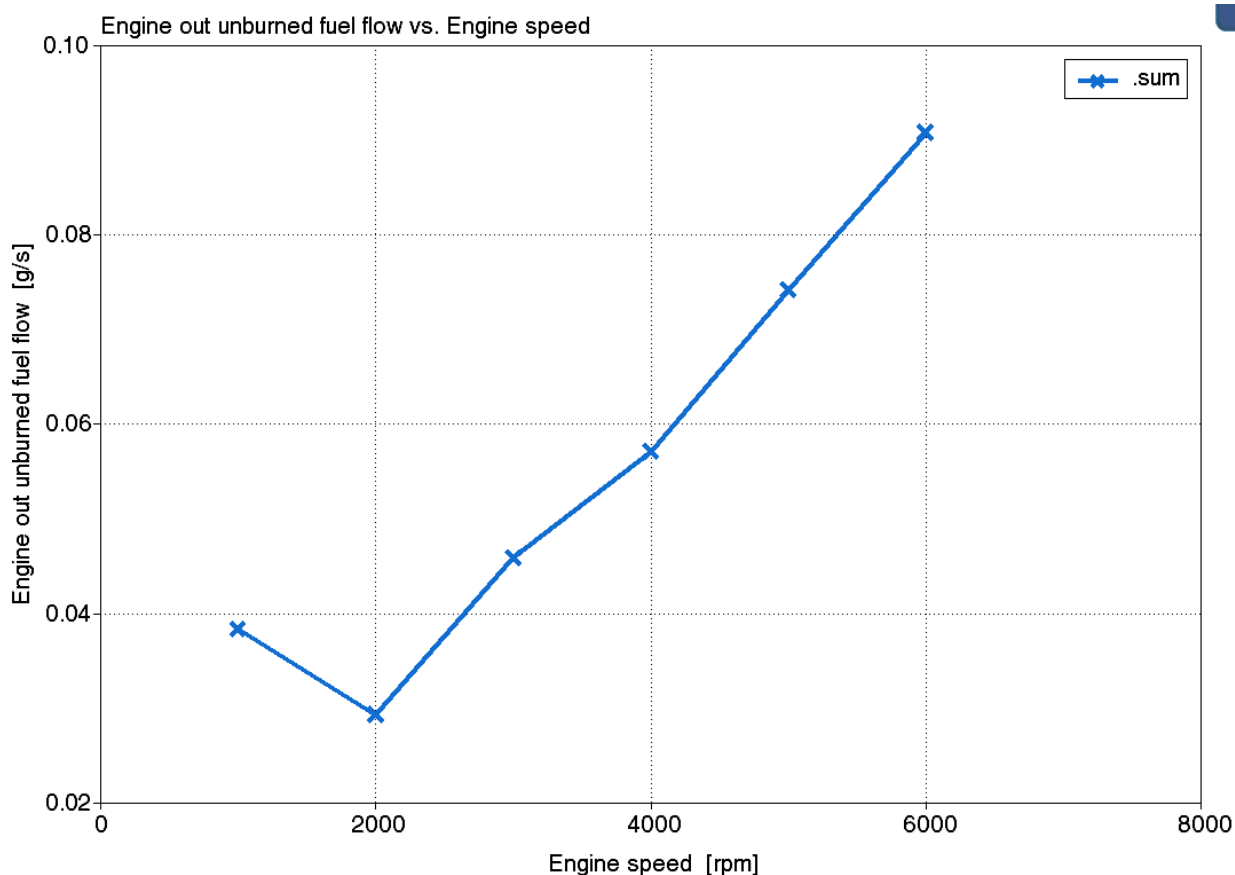


Рисунок 2.25 – Токсичность по продуктам не полного сгорания в граммах на секунду при изменении частоты вращения

2.3 Заключение по 2 главе

Задача априорного расчета числа наблюдений, необходимого для репрезентативной выборки, рассмотрена в математической статистике [22] в предположении, что распределение значений изучаемой величины подчиняется нормальному закону. Выполненный нами предварительный анализ, а также результаты исследования В.С. Каменева [23] говорят о том, что названные условия справедливы для распределения вероятностей цикловых значений времени начала, продолжительности и амплитуды импульса ионного тока на датчике ионизации.

Поэтому мы считаем, что результаты экспериментально исследования и их обработка являются достоверными.

ГЛАВА 3 Обзор проведенных экспериментальных исследований с целью оценки наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода

3.1 Результаты экспериментальных исследований

Явление электропроводности фронта пламени характеризуется наличием в процессе горения большого числа ионизированных молекул. Так в зоне горения основными являются следующие ионы: CH_3^+ , CHO^+ , OH^+ , H^+ и H_3O^+ , как это показано в работах [1 – 5]. Поэтому, фронт пламени способен проводить электрический ток, при этом характеристика электрической проводимости определяется, в первую очередь, плотностью ионов в зоне датчика ионизации. На основании этого многие исследователи предполагают, что характеристики электропроводности фронта пламени позволяют более точно оценивать параметры протекания рабочего процесса, на основании чего возможна реализация системы управления работой двигателя по датчикам ионизации [6]. Данная система управления позволит более точно поддерживать эффективные режимы работы двигателя при снижении токсичности. Это особенно необходимо, при дальнейшем ужесточении норм токсичности и активном внедрении газового топлива.

Результаты экспериментальных исследований, проводимых на одноцилиндровой исследовательской установке УИТ-85 с искровым зажиганием представлены в Таблице 3.1. Экспериментальные исследования проводились при работе на степени сжатия 7, постоянном угле опережения зажигания равным 13 градусов поворота коленчатого вала и постоянной частоте вращения 900 оборотов в минуту, при работе бензине и бензине с 5%

Регистрация перемещения фронта пламени внутри цилиндра УИТ-85 (рисунок 3.1) осуществлялась по датчикам ионизации. Датчик ионизации 1 располагался у свечи зажигания (рисунок 3.2а), а датчик ионизации 2

установлен в переходник с датчиком давления (рисунок 3.2б). Такое расположение датчиков ионизации позволяет оценивать параметры распространения фронта пламени в начальной и заключительной фазах сгорания.

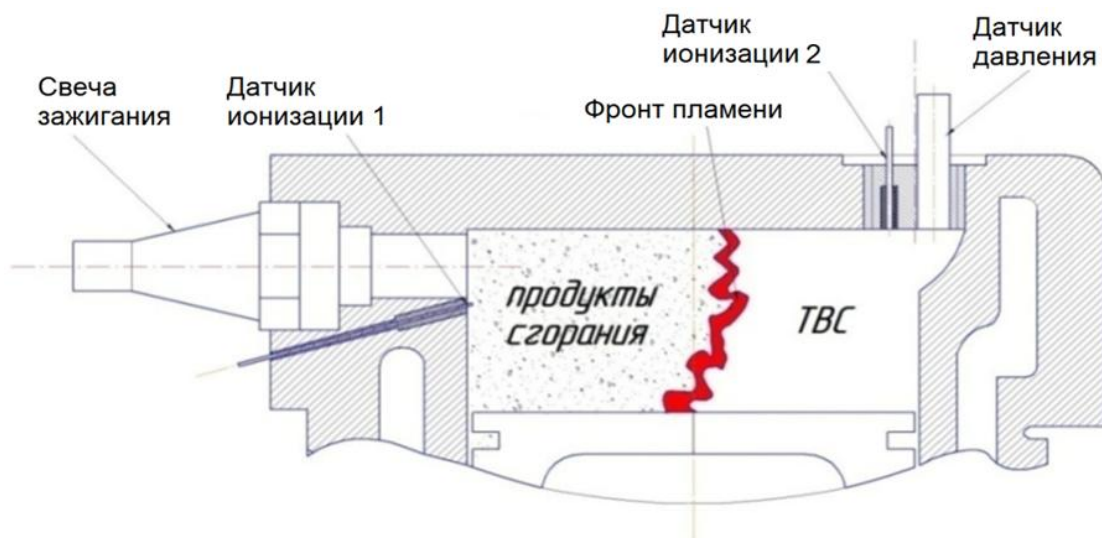


Рисунок 3.1 – Схема камеры сгорания установки УИТ-85



а)



б)

Рисунок 3.2 – Применяемые датчики ионизации: (а) датчик ионизации 1, установленный рядом со свечей зажигания; (б) датчик ионизации 2, установленный рядом с датчиком давления ДМВГ-50

Работа установки осуществлялась при фиксированном угле опережения зажигания в 13° ПКВ и частоте вращения 900 ± 9 мин⁻¹. Методика эксперимента заключалась в параллельной записи сигналов многоканальным аналоговым цифровым преобразователем L-783M L-CARD. Сигналы

регистрировались со следующих датчиков: ионизации, искры зажигания, положения коленчатого вала, давления в цилиндре двигателя, массового расхода воздуха. Природный газ и водород подавались отдельно во впускной коллектор за карбюратор, массовый расход газа определялся по тарированной скважности форсунок.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментальных исследований наличия взаимосвязи электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в ДВС с промотирующими добавками водорода

Коэффициент избытка воздуха	Массовая доля водорода в топливе, %	Время появления сигнала на 1-ом датчике ионизации, мс	Сила тока на 1-ом датчике ионизации, мкА	Напряжение на 1-ом датчике ионизации, В	Напряжение на 2-ом датчике ионизации, В	Время появления сигнала на 2-ом датчике ионизации, мс	Сила тока на 1-ом датчике ионизации, мкА	Концентрация углеводородов в отработавших газах C_{CH} , ppm
1,53936	15,0343	1,10455	64,6833	0,36	0,19464	5,57992	32,9893	70
1,42179	15,0488	1,06052	106,177	0,614	0,28123	5,33377	47,6662	70
1,33825	14,9723	0,97053	162,017	0,966	0,4069	5,1063	68,9664	80
1,46227	9,98225	1,1753	86,1781	0,514	0,25092	5,7081	42,5285	100
1,20768	15,0145	0,86422	292,905	1,667	0,72576	4,7406	123,01	80
1,35383	10,0199	1,08187	149,401	0,891	0,38345	5,46667	64,9912	100
1,12335	14,9932	0,83063	377,914	2,215	0,8927	4,60937	151,305	80
1,22671	10,039	0,97628	258,082	1,51	0,64674	5,13316	109,617	110
1,13581	10,0072	0,93557	342,721	2,009	0,83828	4,98408	142,081	110
1,19725	8,88332	0,97765	280,696	1,628	0,70207	5,11704	118,996	90
0,9884	15,0237	0,82979	467,814	2,718	1,14102	4,51537	193,393	100
1,36621	0	2,13388	51,2313	0,299	0,21327	7,18176	36,1469	130
1,00092	9,98909	0,91567	450,343	2,628	1,16151	4,82009	196,867	150
1,31734	0	1,98277	61,0058	0,396	0,27838	6,92923	47,1827	120
0,92807	10,3873	1,05729	433,869	2,521	1,19375	5,01407	202,33	140
0,80314	15,0095	1,3059	243,884	1,438	0,77479	5,51695	131,32	170
1,26382	0	1,75298	100,209	0,575	0,39606	6,59857	67,129	120
1,17515	0	1,49691	185,322	1,089	0,65685	6,2223	111,331	110
1,00515	0	1,33794	340,975	2,017	1,14823	5,96125	194,615	130
0,90525	0	1,49229	316,844	1,839	1,12283	6,2625	190,31	150
0,84045	0	1,84289	211,85	1,225	0,87843	6,7803	148,887	170
0,76991	0	2,825	77,0524	0,437	0,39145	8,20449	66,3475	210
0,80605	9,9915	1,84289	211,85	0,951	0,87843	6,7803	148,887	220

Результаты влияния состава смеси, при варьировании доли водорода в топливе, на характеристики электропроводности приведены на рисунках 3.3 и 3.4. Из рисунков, где показаны характеристики электропроводности, мы видим, что с увеличением доли водорода повышается интенсивность сигнала и его стабильность, как на датчике у свечи зажигания, так и на датчике ионизации 2, расположенном в удаленной от свечи зажигания части камеры сгорания.

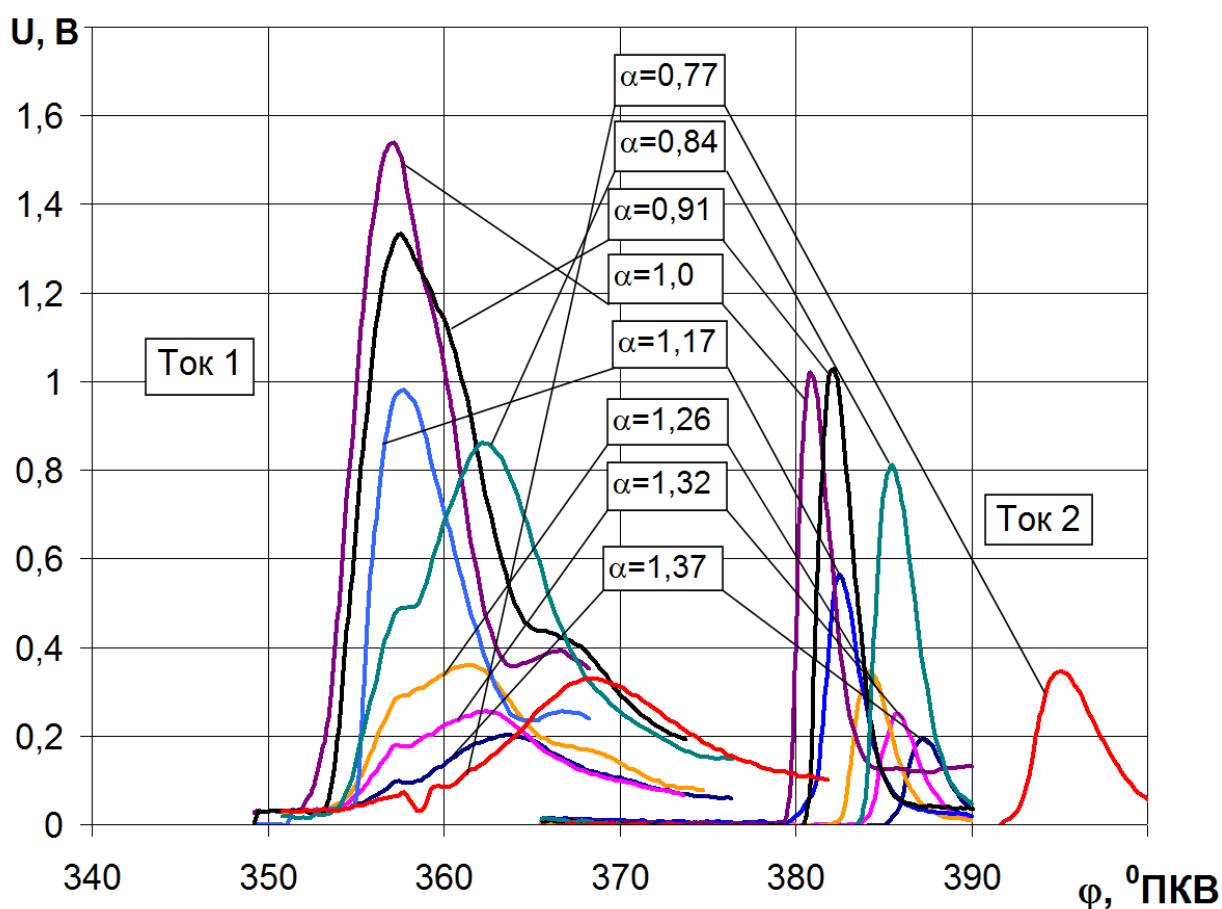


Рисунок 3.3 – Влияние коэффициента избытка воздуха при работе на бензине на характеристики электропроводности пламени

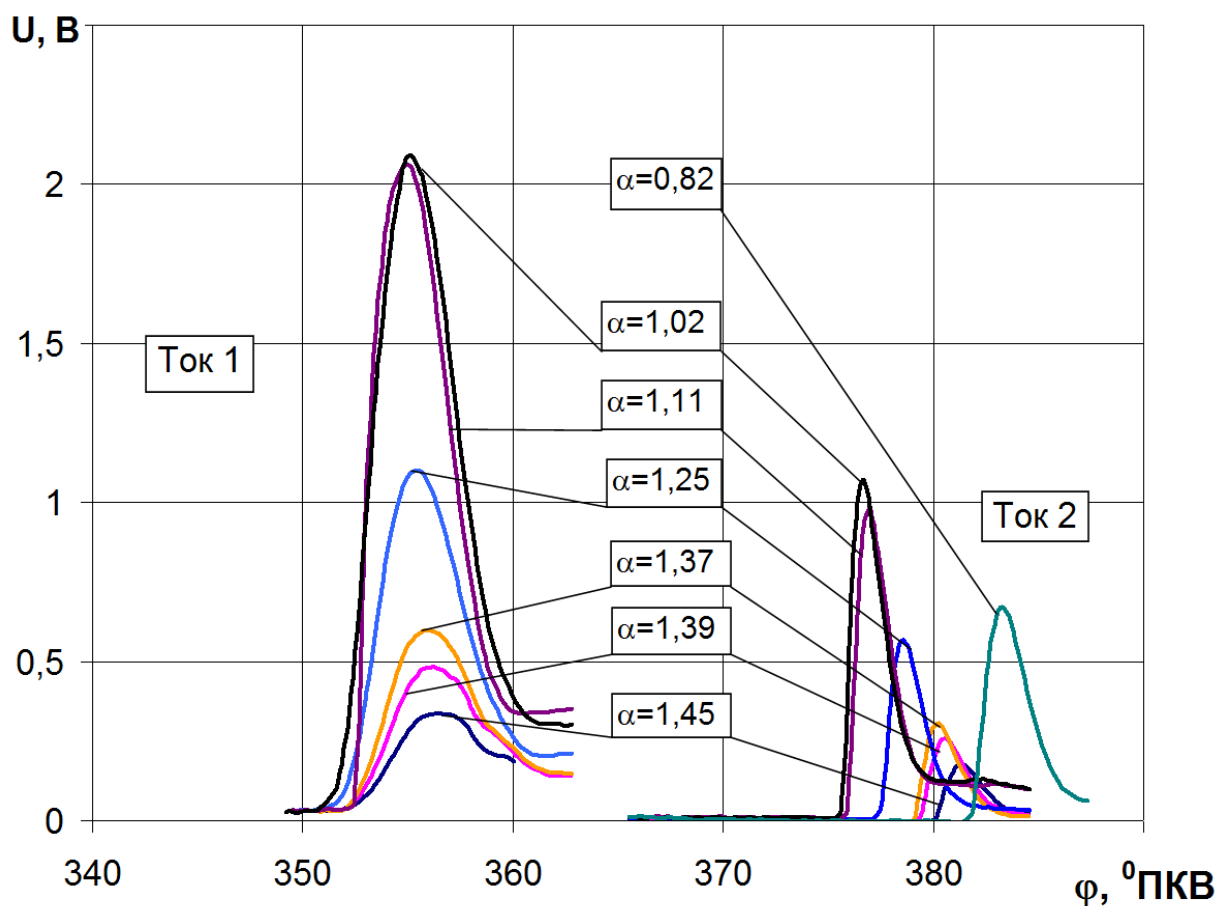


Рисунок 3.4 – Влияние коэффициента избытка воздуха при работе на смеси состоящей из бензин = 95% и $H_2 = 5\%$ на характеристики электропроводности пламени

Работа на УИТ-85, по температуре в процессе сгорания, соответствует работе атмосферного двигателя на максимальных нагрузках. На рисунке 5 представлена токсичность по продуктам неполного сгорания, а именно представлена концентрация по углеводородам (СН) в отработавших газах. Токсичность по СН зависит от характера протекания сгорания, что соответственно и отражается на рисунке 3.5.

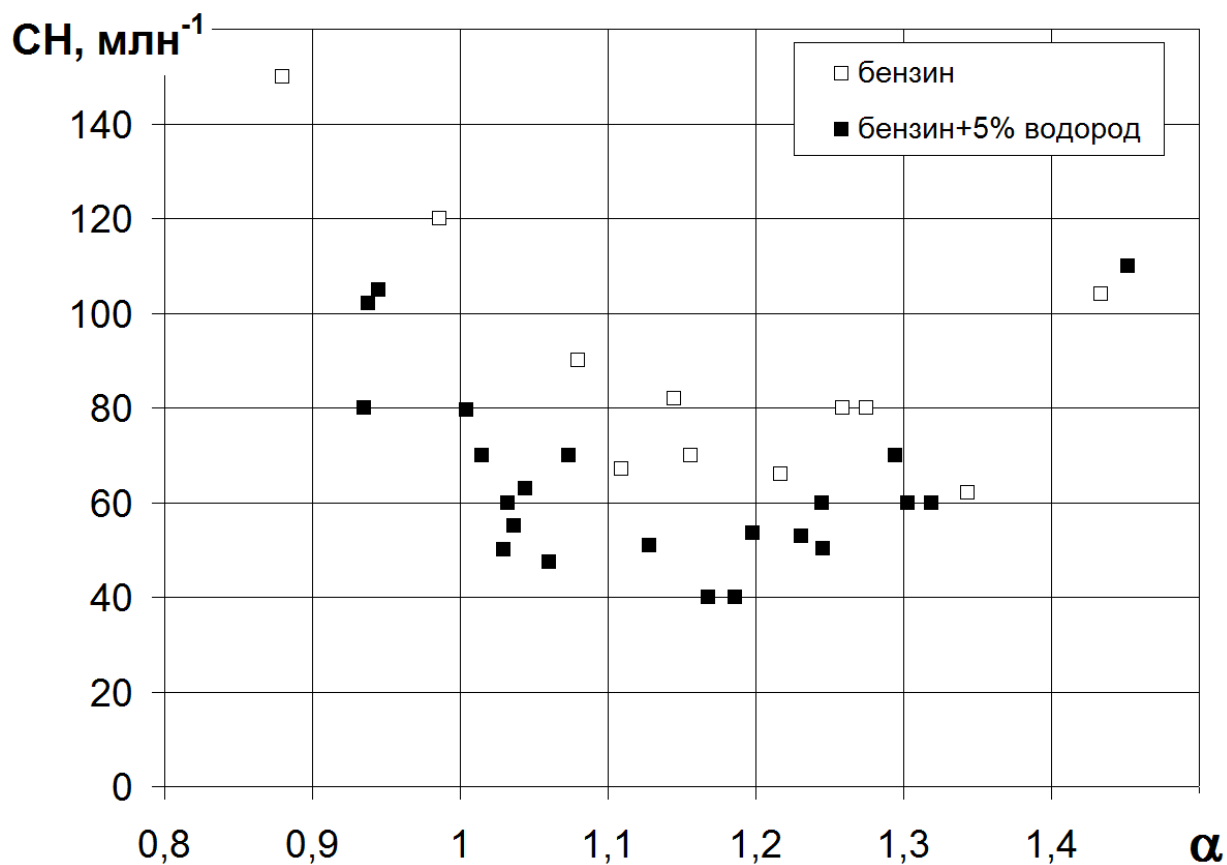


Рисунок 3.5 – Концентрация токсичных компонентов в отработавших газах для УИТ-85 при работе на бензине, бензине с 5% водорода

Характер протекания сгорания определяется характеристиками электропроводности пламени, поэтому существующую взаимосвязь мы выявим при дальнейшем проведении исследований.

Глава 4 Возможности снижения токсичности отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода

4.1 Концентрация несгоревших углеводородов (СН) в отработавших газах для УИТ-85

Рассмотрим влияние вида топлива на токсичность отработавших газов при работе на исследовательской одноцилиндровой установке УИТ-85. Работа на УИТ-85 по температуре в процессе сгорания соответствует работе атмосферного двигателя на максимальных нагрузках. На рисунке 4.1 показана токсичность по углеводородам (СН).

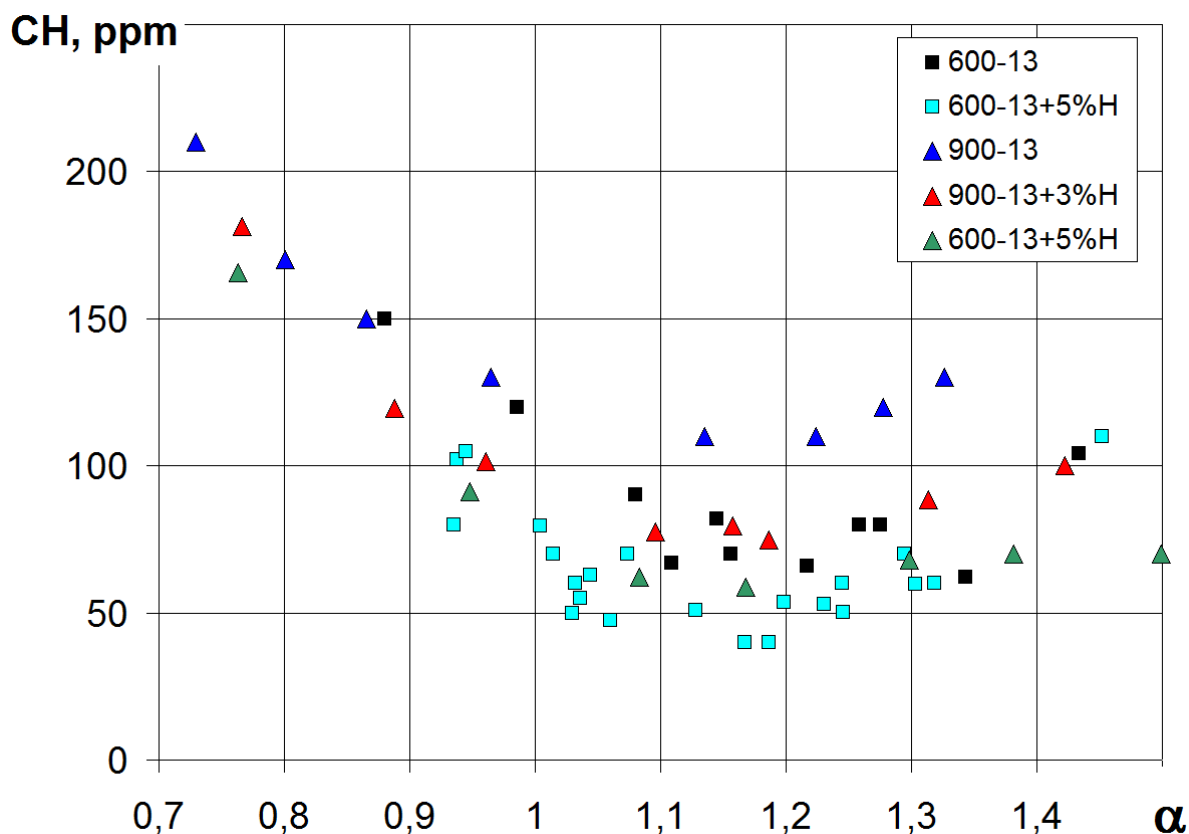


Рисунок 4.1 – Концентрация несгоревших углеводородов (СН) в отработавших газах для УИТ-85

Токсичность по СН зависит от характера протекания сгорания, это отчетливо видно на рисунке 4.1. где показано, что при работе на бензине токсичность по СН наибольшая при этом при уменьшении частоты вращения токсичность снижается, это связано с тем, что при постоянном угле опережения зажигания и увеличении оборотов продолжительность процесса сгорания по углу поворота коленчатого вала увеличивается, что увеличивает долю пристеночных углеводородов в отработавших газах. При добавке водорода в бензовоздушную смесь концентрация СН уменьшается, но все равно она больше чем при работе на бензине с водородом при частоте вращения 600 мин^{-1} .

На токсичность по СН в большей степени оказывают влияние параметры пристеночного слоя [14]. Пристеночный слой при работе на бензине становится больше по площади из-за увеличения продолжительности сгорания, по сравнению с работой при добавке водорода. При этом плотность пристеночного слоя также достаточно высока, в связи с высокими скоростями тепловыделения в конце процесса сгорания. Это приводит к увеличению удельной токсичности отработавших газов по углеводородам. Добавка водорода в бензовоздушную смесь приводит к большему увеличению скорости активации процесса сгорания. Это сказывается в значительном сокращении задержки воспламенения. Это приводит к более заметному снижению токсичности по СН в зоне бедных смесей для бензовоздушной смеси с добавками водорода.

4.2 Концентрация СН в двигателе ВАЗ-2111

Рассмотрим влияние вида топлива на токсичность при работе двигателя на холостом ходу при степени сжатия 9.8 и 7.5. На рисунке 4.2 и 4.3 представлена концентрация СН в отработавших газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Из рисунков 4.2 и 4.3 видно, что токсичность по СН при работе на сжатом природном газе и бензине находится на одной

кривой и слабо зависит от степени сжатия. Добавка водорода в бензин приводит к некоторому снижению токсичности [17]. Значительное снижение токсичности по СН наблюдается при добавке водорода в сжатый природный газ. Что заметно для обеих рассматриваемых степеней сжатия. Это объясняется лучшей активацией процесса сгорания природного газа в начальной фазе сгорания. В основной фазе сгорания сжатом природном газе за счет своей более высокой диффузионной активности позволяет осуществить быстрое и полное сгорание [18].

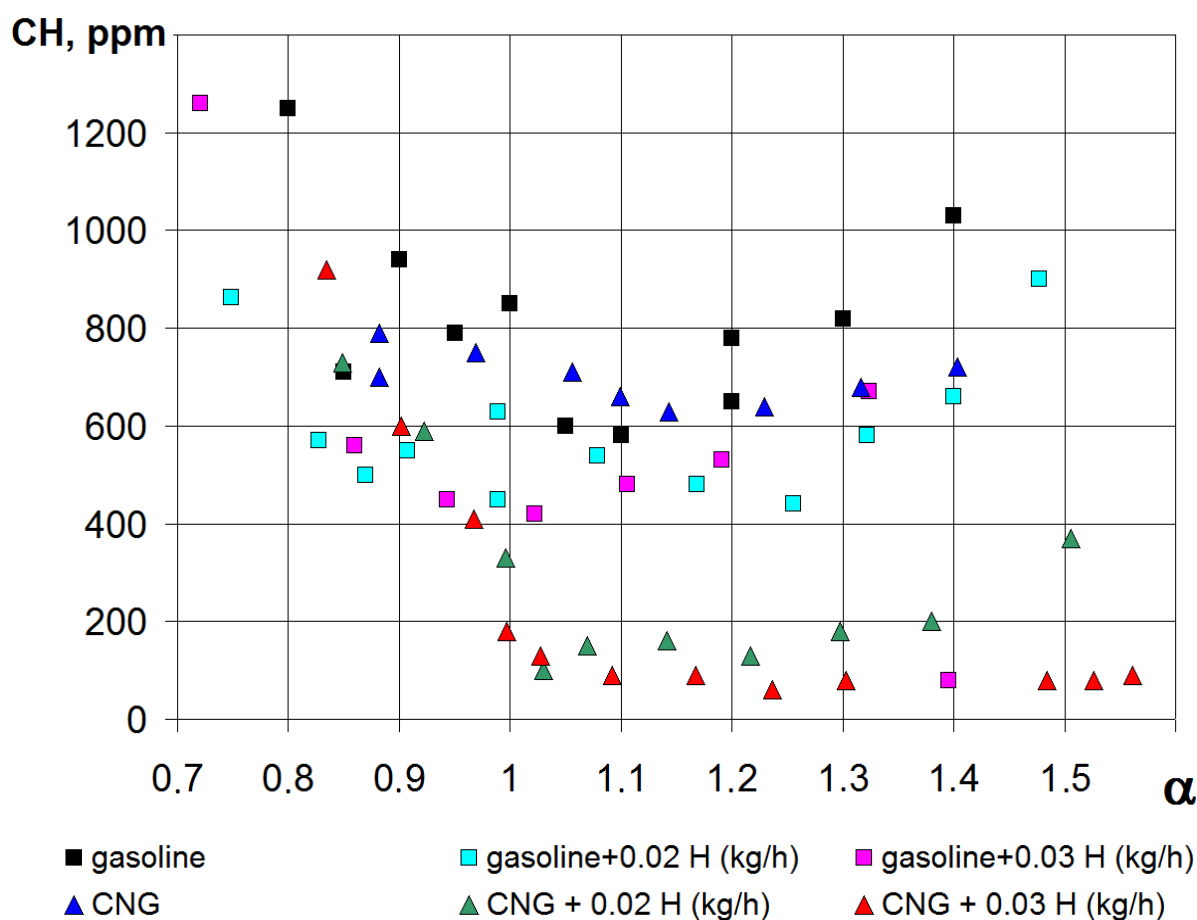


Рисунок 4.2 – Концентрация СН в двигателе ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водородом, сжатом природном газе (CNG) и сжатом природном газе с водородом при степени сжатия 9.8

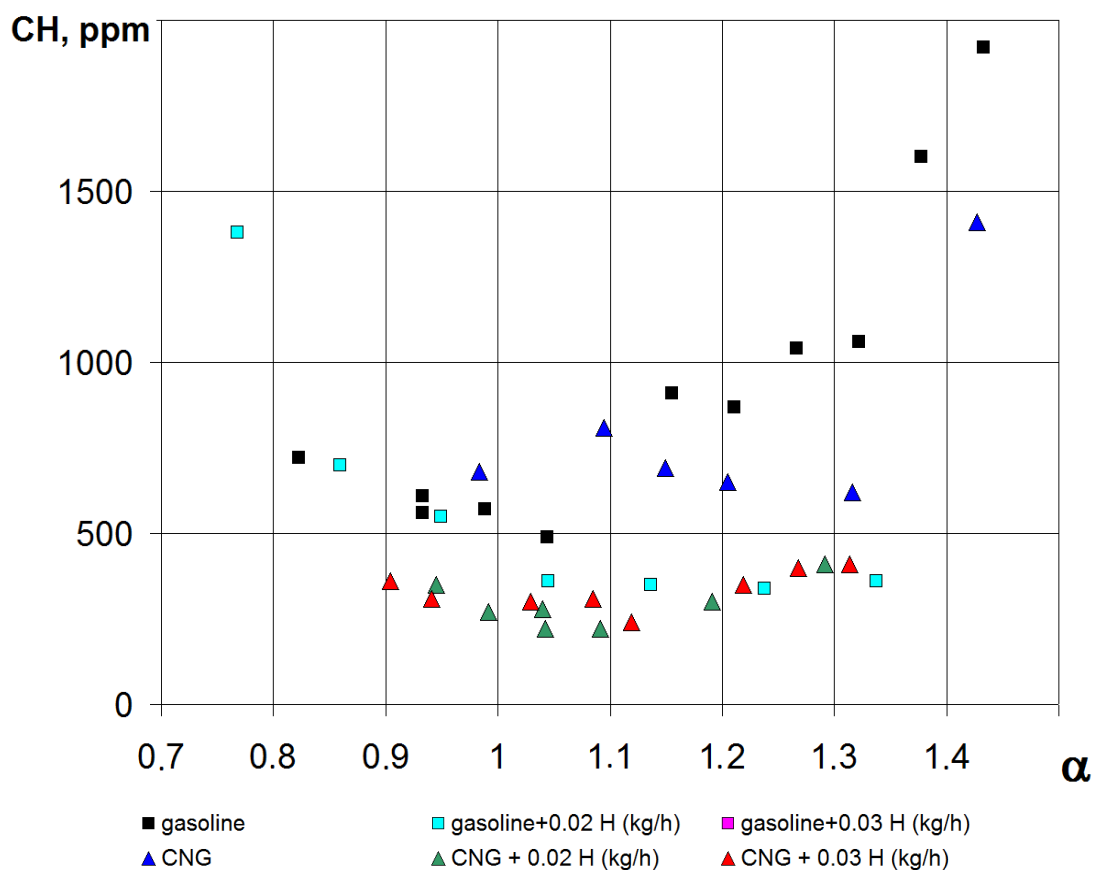


Рисунок 4.3 – Концентрация СН в двигателе ВАЗ-2111 при работе на бензине, бензине с водородом, сжатом природном газе (CNG) и сжатом природном газе с водородом при степени сжатия 7.5

Добавка водорода позволяет промотировать процесс сгорания, что отражается на снижении токсичности по несгоревшим углеводородам. Это отражается как в условиях холостого хода при сильной забалластированности рабочей смеси отработавшими газами, так и при нагрузочных условиях работы имитируемые на одноцилиндровой установке УИТ-85.

4.3 Связь токсичности по несгоревшим углеводородам с характеристиками электропроводности пламени

Рассмотрим влияние температуры на условия образования несгоревших углеводородов (СН) в цилиндре двигателя (рисунок 4.4).

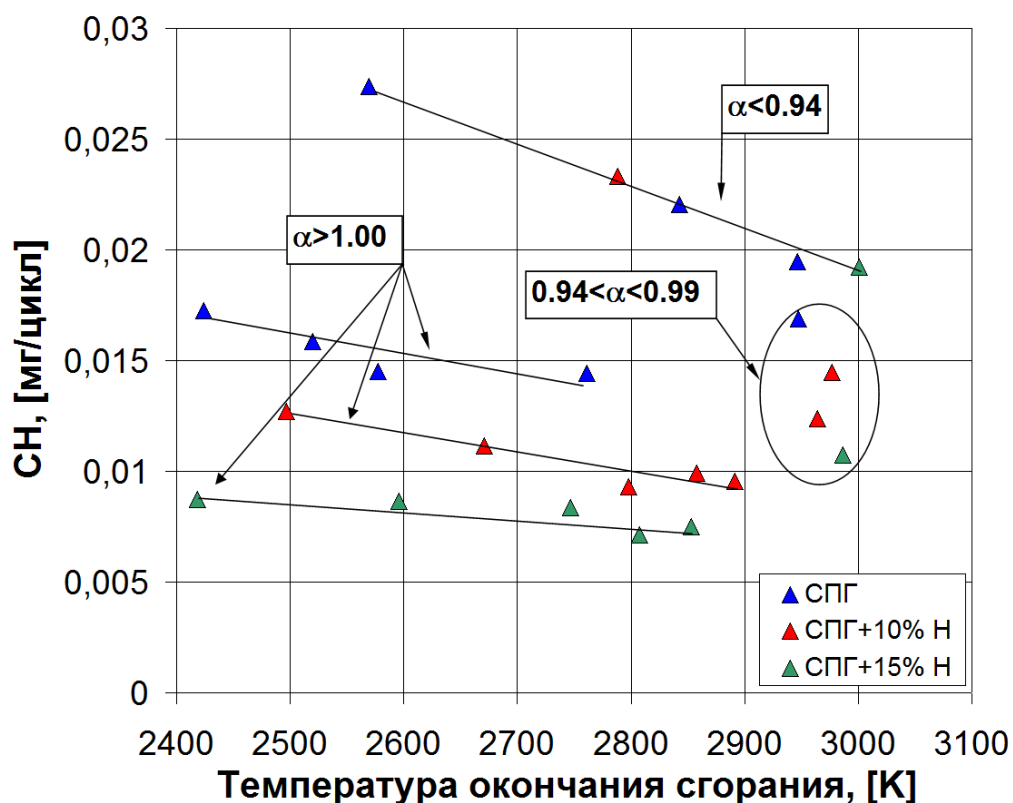


Рисунок 4.4 – Связь СН с температурой при завершении сгорания

Из рисунка 4.4, видно, что СН практически не зависят от температуры в процессе сгорания. Их содержания в большей мере зависит от достаточности кислорода для полного сгорания и уменьшения общего количества сгорающих углеводородов в связи с замещением углеводородного топлива водородом, который полностью сгорает, забирая с собой кислород. Поэтому для смесей имеющих значительный недостаток кислорода мы не можем увидеть уменьшение токсичности в связи с меньшей концентрацией углеводородного топлива при добавке водорода. Рассматривая механизмы образования СН в цилиндре двигателя, в основном выделяют механизм образования СН в объеме в связи с недостатком кислорода или при значительном снижении скорости сгорания. Это приводит к прорыву несгоревших СН в зону продуктов сгорания, где окислительные процессы значительно менее активны. Этот механизм, помимо состава смеси, также отражается температурой процесса сгорания [11]. Видно, что в нашем случае температуры сгорания превышают 2400К. Поэтому значительного

снижения скорости сгорания в проведенных исследованиях не наблюдалось. Второй механизм образования СН, это механизм связанный с обрывом цепей горения вблизи стенок. По причине активного снижения температуры смеси у стенки вследствие теплоотвода в стенку [11]. Этот же механизм имеет место при затухании пламени в зажатых объемах, которым является, в нашем случае, зона между поршнем и цилиндром до первого компрессионного кольца. В нашем случае конструкция двигателя в процессе экспериментов не менялась. Следовательно, влияние данного механизма мы отследить не сможем. Рассмотрим влияние площади стенок камеры сгорания в момент конца сгорания на токсичность по СН (рисунок 4.5).

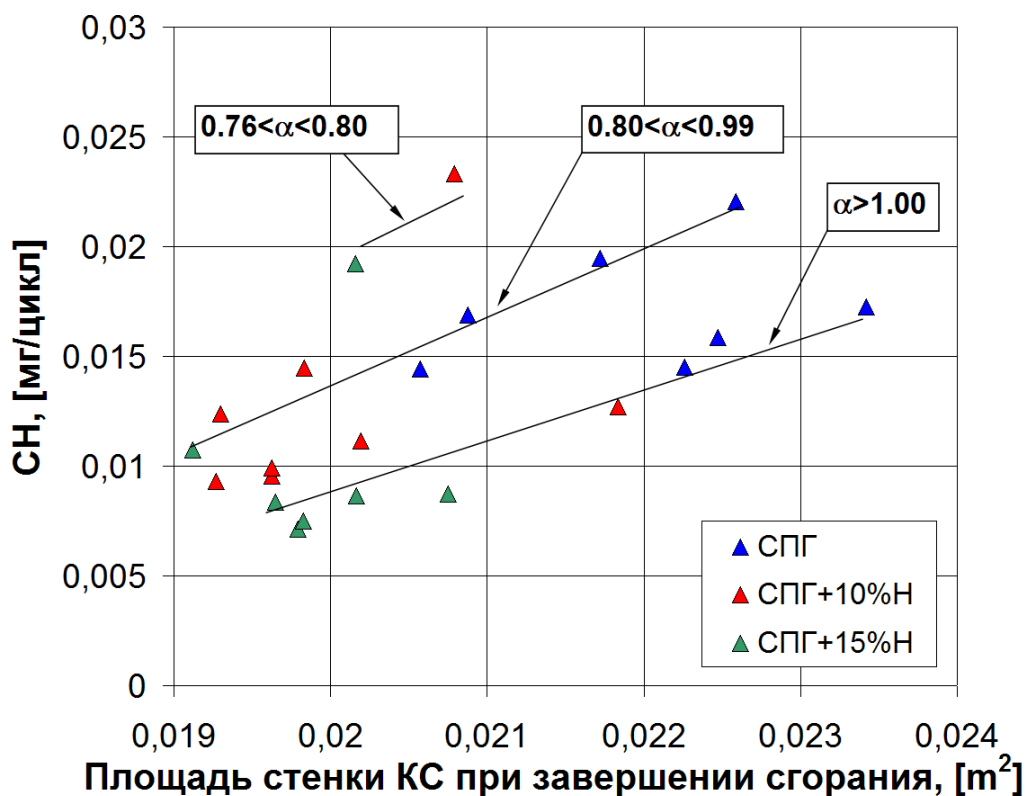


Рисунок 4.5 – Связь СН с площадью стенок в конце сгорания

На рисунке 4.5 наглядно показана значимость увеличения площади стенок при увеличении длительности процесса сгорания на токсичность по СН. Принимая во внимание что при работе на смесях, имеющих избыток кислорода у нас имеется полное сгорание во фронте пламени. Следовательно,

основным источником СН будет является пристеночный замороженный слой, увеличение площади которого линейно сказывается на токсичности по СН. При недостатке кислорода мы также наблюдаем линейную зависимость токсичности по СН и площади пристеночного слоя в конце процесса сгорания. Полученные линейные зависимости показывают, что к СН остающихся в пристеночном слое добавляются СН образующиеся в объеме в связи с недостатком кислорода. При этом влияние состава топлива определяется лишь в том, что с добавкой водорода увеличивается скорость горения. Это приводит к уменьшению площади пристеночного слоя. Других факторов снижения токсичности при добавке водорода в углеводородное топливо не выявлено при детальном термодинамическом анализе процесса сгорания. Это показывает, что хотя добавка водорода и снижает концентрацию углеводородного топлива, но в процессе сгорания водород полностью сгорает забирая с собой кислород. А более медленно горящему углеводородному топливу, при дефиците кислорода в смеси, его также не хватает. Это приводит к тому, что за фронтом пламени количество объемных углеводородов определяется общим недостатком кислорода и не зависит от доли водорода в топливе. Таким образом можно говорить, что водород как химический элемент не оказывает активирующего влияния на образование рассматриваемых токсичных компонентов. Его влияние сказывается на изменение термодинамических характеристик процесса сгорания, которые и влияют на условия образования токсичных компонентов.

При анализе факторов, влияющих на токсичность по СН, была выявлена зависимость количества СН в отработавших газах с энергией, введенной с топливом в цилиндр двигателя (рисунок 4.6). Полученные результаты на рисунке 4.6 хорошо коррелируются со сделанными выше выводами. Так увеличение энергии, вводимой в цилиндр с топливом при недостатке кислорода приводит к линейному увеличению токсичности по СН. При этом нет расслоения результатов в связи с добавкой водорода в углеводородное топливо [12]. Это подтверждает сделанное утверждение о

том, что водород полностью сгорает, а весь недостаток кислорода ложится на углеводородное топливо. Поэтому влияния вида топлива на рисунке 4.6 для смесей с недостатком кислорода не выявлено. Для смесей с избытком кислорода, снижение токсичности по СН объясняется более быстрым сгоранием в меньшем объеме, что и приводит к полученным результатам.

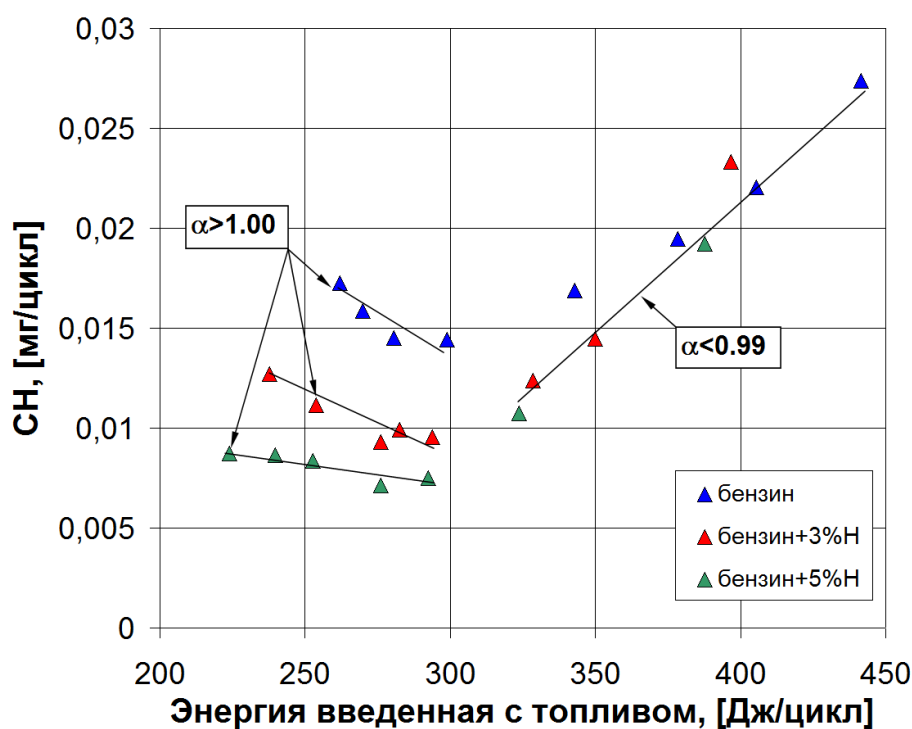


Рисунок 4.6 - Связь с энергией, введенной с топливом в цилиндр

Помимо анализа влияния термодинамических характеристик процесса сгорания на токсичность отработавших газов, была проведена оценка возможности определения токсичности отработавших газов двигателя с искровым зажиганием по характеристикам электропроводности пламени. Основной характеристикой электропроводности пламени является величина амплитуды сигнала ионного тока. Наибольшую корреляцию показала амплитуда ионного тока с датчика установленного в 80 мм от свечи зажигания. На рисунке 3.2 он обозначен как датчик электропроводности 2. Лучшая корреляция электропроводности на удаленном от свечи зажигания датчике объясняется тем, что именно характеристики завершения сгорания

во многом определяют токсичность отработавших газов. Поэтому проведенное сравнение приведено именно по датчику электропроводности 2. Сравнение характеристик токсичности с величиной амплитуды сигнала ионного тока приведены на рисунках 4.7.

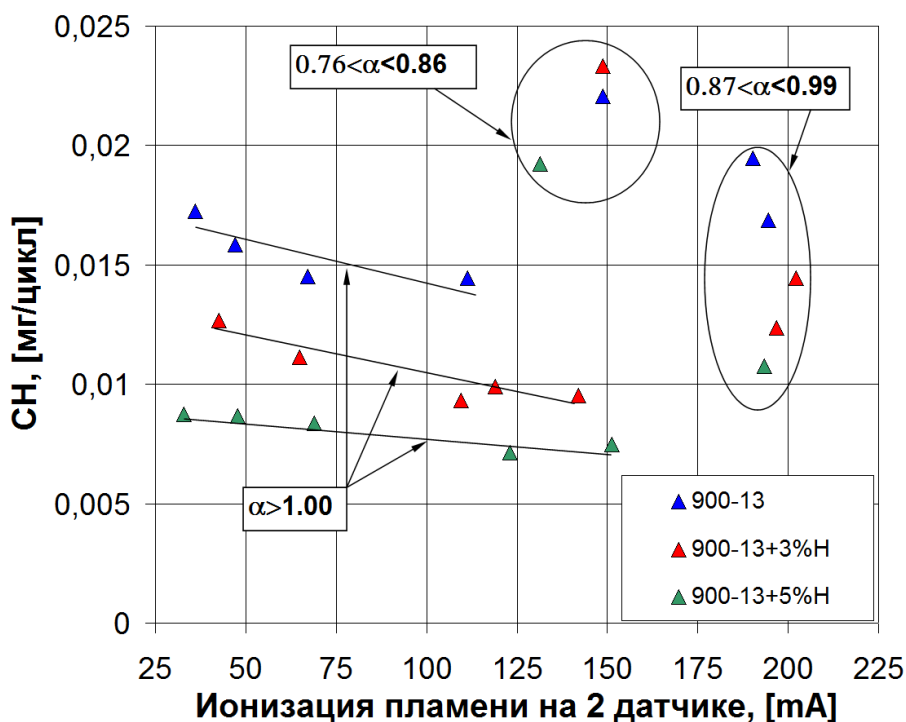


Рисунок 4.7 – Связь с характеристиками электропроводности пламени в конце основной фазы процесса сгорания

Начнем анализ связи токсичности с электропроводностью с рисунка 4.7, где приведена токсичность по CH_4 . Можно отметить наличия явной корреляции между токсичностью по CH_4 и амплитудой сигнала ионного тока, для смесей, не имеющих недостатка кислорода. В тоже время сгорание при недостатке кислорода происходит при высоких скоростях сгорания, что приводит к росту ионного тока. Но дефицит кислорода увеличивает количество объемных CH_4 , тем самым делая мониторинг токсичности CH_4 по амплитуде сигнала для этих составов не возможным.

Также проведем анализ связи токсичности по CH_4 с электропроводностью по результатам, полученным на УИТ-85 при

различных степенях сжатия (рисунок 4.8).

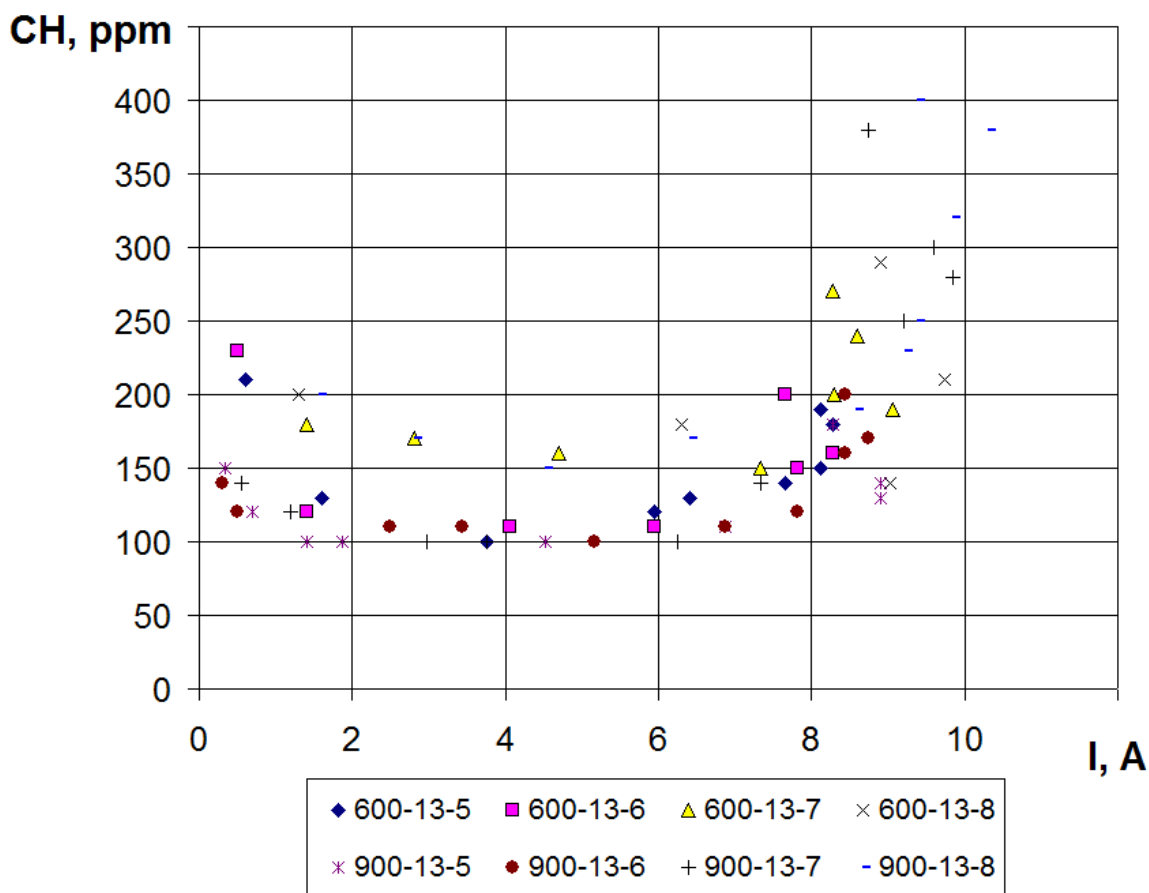


Рисунок 4.8 – Взаимосвязь электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС для частот вращения 600 и 900 об/мин при постоянном угле опережения зажигания 13 и варьировании степени сжатия с 5 до 8

Взаимосвязь электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС. Здесь представлены результаты для частот вращения 600 и 900 об/мин при постоянном угле опережения зажигания 13 и варьировании степени сжатия с 5 до 8. Видим в зоне богатых и стехиометрических смесей повышение выбросов СН при малом изменении ионного тока, что затрудняет корреляцию в этом диапазоне, а для бедных смесей корреляция с ионным током явно присутствует.

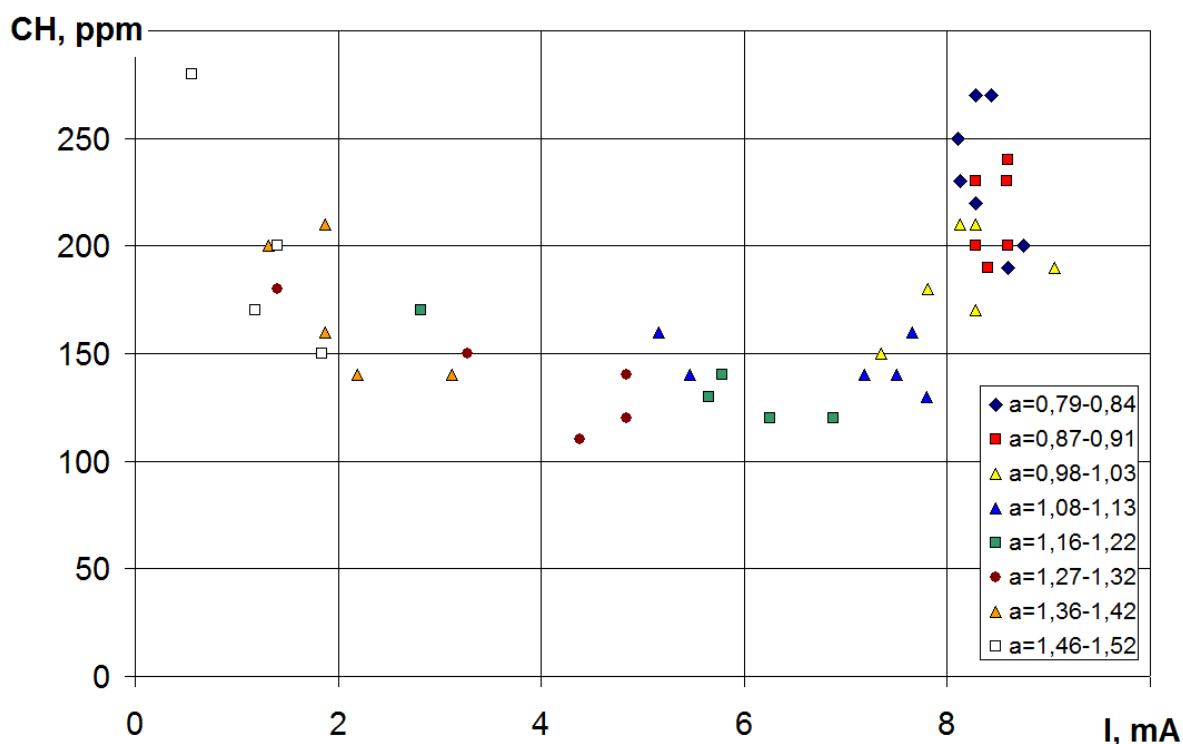


Рисунок 4.9 – Взаимосвязь электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС для частоты вращения 600 об/мин при постоянном угле опережения зажигания 13, постоянной степени сжатия с 7, где варьирование происходит по доле добавляемого водорода от 0 до 6% от массы топлива и составу смеси который и указан маркерам на графике.

Взаимосвязь электропроводности пламени с токсичностью отработавших газов по углеводородам в бензиновом ДВС с промотирующими добавками водорода до 6% от массы топлива (рисунок 4.9). Здесь представлены результаты для частот вращения 600 об/мин при постоянном угле опережения зажигания 13, постоянной степени сжатия с 7 и варьирование происходит по доле добавляемого водорода от 0 до 6% от массы топлива и составу смеси который и указан маркерам на графике. Также наблюдается корреляция для бедных смесей, а для богатых корреляция с ионным током практически отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что водород оказывает значительное влияние на термодинамические характеристики процесса сгорания, тем самым влияя на токсичность двигателя по CH , NO_x и CO . При этом эффекта замещения основного углеводородного топлива на снижение токсичности в следствии уменьшении концентрации углеводородного топлива в цилиндре двигателя не выявлено. Наоборот показано, что добавка водорода в при тех же термодинамических условиях не сказывается на токсичности по CH в пристеночном слое или в концентрации CH за фронтом пламени при одинаковом недостатке кислорода.

Проведенная оценка возможности определения токсичных компонентов по амплитуде ионного тока показала возможность данного подхода при оценке токсичности по CH , показано наличие коррелирующих кривых при изменении степени сжатия или добавки водорода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Byttner, S. Estimation of combustion variability using in-cylinder ionization measurements [Текст] / S. Byttner, T. Rognvaldsson, N. Wickstrom // SAE, 2001-01-3485, 2001.
2. Byttner, S. Strategies for handling the fuel additive problem in neural network based ion current interpretation [Текст] / S. Byttner, T. Rognvaldsson, N. Wickstrom // SAE, 2001-01-0560, 2001.
3. Andersson, I. Ion sensing for combustion stability control of a spark ignited direct injected engine [Текст] / I. Andersson, L. Eriksson. // SAE, 2000-01-0552, 2000.
4. Eriksson, L. Ignition control by ionization current interpretation [Текст] / L. Eriksson, L. Nielsen, J. Nytomt // SAE, 960045, 1996.
5. Klovmark, H. Estimating the air/fuel ratio from Gaussian parametrizations of the ionization in internal combustion SI engines [Текст] / H. Klovmark, P. Rask, U. Forssell // SAE, 2000-01-1245, 2000.
6. Hellring, M. An ion current based peak-finding algorithm for pressure peak position estimation [Текст] / M. Hellring, U. Holmberg // SAE, 2000-01-2829, 2000.
7. Forster, J. Ion current sensing for spark ignition engines [Текст] / J. Forster, A. Gunther, M. Ketterer, K.-J.Wald // SAE, 1999-01-0204, 1999.
8. Ohashi, Y. The application of ionic current detection system for the combustion condition control [Текст] / Y. Ohashi, M. Koiwa, K. Okamura, A. Ueda // SAE, 1999-01-0550, 1999.
9. Hellring, M. Spark advance control using the ion current and neural soft sensors [Текст] / M. Hellring, T. Munther, T. Rognvaldsson, N. Wickstrom, C. Carlsson, M. Larsson, J. Nytomt // SAE, 991162, 1999.

10. Hellring, M. Robust AFR estimation using the ion current and neural networks [Текст] / M. Hellring, T. Munther, T. Rognvaldsson, N. Wickstrom, C. Carlsson, M. Larsson, J. Nytomt // SAE, 991161, 1999.
11. Ohashi, Y. The application of ionic current detection system for the combustion limit control [Текст] / Y. Ohashi, W. Fukui, F. Tanabe, A. Ueda // SAE, 980171, 1998.
12. Reinmann, R. Fuel and additive influence on the ion current [Текст] / R. Reinmann, A. Saitzkoff, B. Lassesson, P. Strandh // SAE, 980161, 1998.
13. An, F. Combustion diagnostics in methane-fueled SI engine using the spark plug as an ionization probe [Текст] / F. An, G. Rizzoni, D. Upadhyay // SAE, 970033, 1997.
14. Hellring, M. An ion current based peak-finding algorithm for pressure peak position estimation [Текст] / M. Hellring, U. Holmberg // SAE, 2000-01-2829, 2000.
15. Saitzkoff, A. An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor [Текст] / A. Saitzkoff, R. Reinmann, T. Berglind, M. Glavmo // SAE, 960337, 1996.
16. Saitzkoff, A. In-cylinder pressure measurements using the spark plug as an ionization sensor [Текст] / A. Saitzkoff, R. Reinmann, F. Mauss, M. Glavmo // SAE, 970857, 1997.
17. Reinmann, R. Local air-fuel ratio measurements using the spark plug as an ionization sensor [Текст] / R. Reinmann, A. Saitzkoff, F. Mauss // SAE, 970856, 1997.
18. Auzins, J. Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock, and Engine Control [Текст] / J. Auzins, H. Johansson, J. Nytomt // SAE 950004
19. Smolenskaya, N.M. Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel [Текст] / N.M. Smolenskaya, N.V. Korneev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.

- 20.Вибе И.И., Тепловой расчёт двигателей внутреннего сгорания [Текст] / И.И. Вибе // Челябинск: Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, 1972. - с.282
- 21.Улыбышев, К.Е. Расчёт влияния постоянного электрического поля на газодинамику и эмиссию окислов азота в ламинарном диффузионном пламени [Текст] / К.Е. Улыбышев // МЖГ. №1, 2000. - С.55-71.
- 22.Проскурин, В.Ф. Цепно-тепловой взрыв и степень ионизации водородовоздушного пламени [Текст] / В.Ф. Проскурин, П.Г. Бережко, Е.Н. Николаев, В.Н. Тараканов, П.Е. Половинкин, А.Г. Лещинская // Физика горения и взрыва. 2005. № 1. С.15-23.
- 23.Сеначин, П.К. Моделирование процесса горения гомогенной смеси в двигателе с искровым зажиганием [Текст] / П.К. Сеначин, М.А. Ильина, Д.Д. Матиевский, М.Ю. Свердлов //Тез. XII симпозиума по горению и взрыву, 11-15 сентября 2000 г. Черноголовка: РАН, 2000.- ч.3. - с.155-157.
- 24.Heywood, J. B. Fluid Motion Within the Cylinder of Internal Combustion Engines - The 1986 Freeman Scholar Lecture [Текст] / J. B. Heywood // Journal of Fluids Engineering Vol. 109 / 3. 1987.
- 25.Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals [Текст] / J. B. Heywood// New York: McGraw-Hill. 1988.
- 26.Hiroyasu, H. Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber [Текст] / H. Hiroyasu, T. Kodata // SAE Paper 740715. 1974.
- 27.Huiming, Z. Investigation on the Combustion Characteristics of the Compression Ignition Divided Chamber Combustion System of the Natural Gas Engine [Текст] / Z. Huiming, Z. Defu, Z. Qingping // in: CIMAC Congress. Wien. 2007.
- 28.Русаков, М.М., Оценка токсичности бензинового двигателя при добавках водорода в режимах пуска и прогрева [Текст] / М.М.Русаков, Л.Н.Бортников, А.Н.Афанасьев, Д.А.Павлов // Ежемесячный

- теоретический и прикладной научно-технический журнал «Автотракторное электрооборудование», № 1, 2005.
29. Павлов, Д.А., Токсичность автомобиля ВАЗ-21102 при добавке водорода на режимах пуска и прогрева [Текст] / Д.А.Павлов, Л.Н.Бортников, А.Н.Афанасьев, М.М.Русаков, В.А.Тимчук, В.Е.Лукашев // Международный симпозиум «Образование через науку»: Сб. научных трудов - Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
30. Русаков, М.М., Водород и ДВС автомобиля [Текст] / М.М.Русаков, Д.А.Павлов, А.П.Шайкин, Л.Н.Бортников, А.Н.Афанасьев // Международная научно-техническая конференция «Рабочие процессы и технология двигателей»: Сб. статей - Казань, КГТУ им. А.Н. Туполева, Институт авиации, наземного транспорта и энергетики, 2005.
31. Ивашин, П.В., Взаимосвязь ионного тока в камере сгорания бензинового ДВС и концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах [Текст] / П.В.Ивашин, А.П.Шайкин // Наука производству, №5, М., 2005. С. 10-12.
32. Кульчицкий, А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие [Текст] / А.Р. Кульчицкий // Владимирский гос. университет. Владимир, 2000.
33. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени [Текст] / перевод с англ. Ю.Ф. Дитякина // Машиностроение. М. 1981.
34. Воинов, А.И., Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях [Текст] / А.И. Воинов // М.: Машиностроение. 1977.
35. Асмус, Т.У. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями [Текст] / Т.У. Асмус, К. Бргннакке и др.; под ред. Д.Хиллиарада, Дж.С. Спрингера; перевод с англ. Васильева; под ред. А.В. Кострова // – М.: Машиностроение, 1988.
36. Основы горения углеводородных топлив [Текст] / перевод с англ. под ред. Л.И. Хитрина и А.И. Попова // – Изд. иностр. литературы. – 1960

37. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. Изд.: Ч.1: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда // Металлургия, 1988.
38. Иссерлин, А.С. Основы сжигания газового топлива [Текст] / А.С. Иссерлин // Справ. Пособие. - Л.: 1987
39. Звонов, В.А., Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.А. Звонов // М.: Машиностроение, 1981.
40. Жегалин, О.И., Снижение токсичности автомобильных двигателей [Текст] / О.И. Жегалин, П.Д. Лукачев // - М.: Транспорт, 1985.
41. Ивашин, П.В., Электропроводность пламени, средняя скорость сгорания и концентрация несгоревших углеводородов в ОГ бензиновых двигателей [Текст] / П.В. Ивашин, П.В. Коломиец, А.П. Шайкин, В.И. Строганов // Автотракторное электрооборудование № 1-2, 2004, с. 38 – 39.
42. Степанов, Е.М., Ионизация в пламени и электрическое поле [Текст] / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков // М.: Металлургия, 1968.
43. Аравин, Г.С., Ионизация пламенных газов в условиях бомбы и двигателя [Текст] / Г.С. Аравин // Дис. ИХФ АН СССР, 1952.
44. Иноземцев, Н.В., Процесс сгорания в двигателях [Текст] / Н.В. Иноземцев, В.К. Кошкин, Под Общ. ред. Н.В. Иноземцева // М.: изд-во 1-я тип. Машгиза в Лгр., 1949
45. Ивашин, П. В. Зависимость концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах бензиновых ДВС от скорости распространения пламени и ионного тока [Текст]: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.04.02 / П. В. Ивашин // Тольятти, 2004. - 23 с.
46. Смоленский, В.В. Особенности процесса сгорания в бензиновых двигателях при добавке водорода в топливно-воздушную смесь [Текст]: автореферат дис. кандидата технических наук : 05.04.02 / В. В. Смоленский - Тольятти, 2007. - 20 с.

- 47.Ивашин, П.В., Взаимосвязь электропроводности пламени и показателя сгорания в бензиновых двигателях [Текст] / П.В. Ивашин, П.В. Коломиец, В.В. Смоленский, А.П. Шайкин // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров. Материалы 49-ой МНТК ААИ. 23-24 марта, 2005г. МГТУ «МАМИ». – М: 2005. – С. 94-99
- 48.Ивашин, П.В., Контроль и регулирование процесса сгорания по ионному току в заключительной фазе сгорания [Текст] / П.В. Ивашин, П.В. Коломиец, В.В. Смоленский, А.П. Шайкин // Известия Самарского научного центра РАН специальный выпуск ELPIT-2005 том 1. – Самара, 2005 – С. 299-305