

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)

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

Водородная энергетика и декарбонизация в энергетических системах
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Снижение выбросов парниковых газов при сжигании ископаемого
топлива

Обучающийся А.В. Масленникова
(Инициалы Фамилия) (личная подпись)

Научный руководитель к.т.н., доцент, В.В. Смоленский
(ученая степень, ученое звание, Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1 Анализ исследовательских работ, посвященных уменьшению эмиссии парниковых газов в процессе сгорания ископаемых видов топлива за счет применения водородных добавок в двигателях с искровым воспламенением.....	6
1.1 Водород для устойчивого развития перспективных энергетических систем	7
1.2 Хранение и распространение водорода	15
1.3 Применение водорода для повышения характеристик горения природного газа	18
1.4 Водородные двигатели внутреннего сгорания	25
Глава 2 Введение водорода для улучшения качества сгорания природного газа	30
Глава 3 Обзор результатов экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа с добавкой водорода в УИТ-85 при подаче топлива во впускной трубопровод	42
3.1 Воздействие угла опережения зажигания на особенности горения метана	42
3.2 Воздействие компонентов газовой смеси на свойства горения природного газа	47
Глава 4 Результаты анализа экспериментов на сжигание метана с добавкой водорода на стенде УИТ-85 с инжекцией во впускной коллектор	54
Заключение.....	64
Список используемых источников.....	65

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы и научная значимость настоящего исследования.

В сфере, где акцент делается на экологичность и устойчивое развитие, с прицелом на минимизацию экологического загрязнения и внедрение инновационных подходов как в автомобилестроении, так и в производстве энергии, актуально внедрение новых методик: в этом контексте, водородная технология представляет собой перспективное направление благодаря своей экологичности и потенциалу адаптации под существующие двигатели внутреннего сгорания, при этом адаптируя и переосмысляя достижения, заложенные в разработке традиционных бензиновых двигателей.

В мировом масштабе топливные добавки находят широкое применение для улучшения эффективности топлива, минимизации выхлопных газов, снижения вероятности возникновения детонации и оптимизации условий хранения и транспортировки. Учитывая значительный объем глобального потребления ископаемого топлива, приходящийся на счет двигателей внутреннего сгорания, применение добавок, способных повысить их работоспособность, имеет потенциал радикально влиять на общемировые показатели потребления ископаемых ресурсов и объемов выброса углекислого газа. В рамках данного исследования осуществлен анализ влияния разнообразных топливных добавок на эффективность двигателей внутреннего сгорания, использующих природный газ и бензин. Исследование применения добавок к природному газу акцентировалось на возможности расширения допустимых границ обедненной смеси, тогда как анализ добавок к бензину сфокусирован на увеличении допустимых пределов использования обедненной смеси, сокращении тенденции к детонации и повышении выходной мощности двигателя.

Таким образом, анализ потенциала использования водорода в целях уменьшения эмиссии парниковых газов при горении ископаемых топлив имеет значимость для магистерской работы.

Объект исследования. Двигатель с искровым зажиганием

Предмет исследования. Снижения выбросов парниковых газов

Целью работы является исследование перспективы применения водорода для снижения выбросов парниковых газов при сжигании ископаемого топлива.

Гипотеза исследования состоит в том, что применения водорода в двигателе с искровым зажиганием может обеспечить чистое и эффективное сгорания в ДВС.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. провести обзор проблемных источников и наработать материал для исследования применения водорода для снижения выбросов парниковых газов при сжигании ископаемого топлива;
2. выявить перспективы применения водорода для снижения выбросов парниковых газов в двигателях с искровым зажиганием.

Методы исследования.

Метод аналитического исследования, метод моделирования рабочего процесса, метод экспериментальных исследований.

Научная новизна исследования заключается в идее снизить снижения выбросов парниковых газов в двигателях с искровым зажиганием за счет применения водорода.

Личное участие автора состоит в том, что автор принимал непосредственное участие в формировании аналитического обзора по направлению исследований, а также в разработке модели для исследования и анализе результатов моделирования данных и полученных на основании их анализа практических рекомендаций и выводов.

Апробация и внедрение результатов работы

велись в течении всего исследования. Его результаты докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» в 2022, 2023 и 2024 г.
- международная научно-практическая конференция «Перспективы развития науки и образования», Россия, г. Тамбов, 31 мая 2023 г.
- опубликована одна научная статья: Масленникова А.В. Применения добавки водорода для активации процесса сгорания в бензиновых ДВС / Смоленская Н.М., Масленникова А.В., Смольяков А.Н., Неклюдов Д.А., Анищенко В.И. // Научный альманах 2023·N 5-2(103). С.53-58

На защиту выносятся:

1. анализ перспективы применения водорода для снижения выбросов парниковых газов в двигателях с искровым зажиганием;
2. возможности выбросов парниковых газов в двигателях с искровым зажиганием за счет применения водорода.

Структура магистерской диссертации.

Диссертации состоит из введения, 4 глав, заключения с основными результатами и выводами, содержит 50 рисунков, 1 таблицу, списка использованных источников (78 источник). Основной текст изложен на 72 страницах.

Глава 1 Анализ исследовательских работ, посвященных уменьшению эмиссии парниковых газов в процессе сгорания ископаемых видов топлива за счет применения водородных добавок в двигателях с искровым воспламенением

В будущем, двигатели могут быть адаптированы для использования новых топлив и добавок, однако, для современного автопарка важно, чтобы внедрение топливных добавок не требовало изменений в конструкции двигателей. Процесс модификации требует значительных инвестиций, что может уменьшить число автомобилей, способных извлечь выгоду из новых добавок. В данной работе анализируется эффект от использования различных добавок к природному газу и бензину на процесс сгорания, с возможностью повышения эффективности двигателей без необходимости их изменения.

Двигатели на природном газе часто эксплуатируются при горении смеси с низким содержанием кислорода, что способствует эффективному использованию топлива и минимизации эмиссии оксидов азота (NO_x). В этом контексте основной задачей добавок к топливу является возможность поддержания работы двигателя в условиях ещё большего обеднения смеси. Применение водорода как добавки в природный газ считается одним из наиболее эффективных решений, поскольку это способствует улучшению энергоэффективности и сокращению выбросов вредных веществ. Несмотря на преимущества, использование водорода затруднено его физическими свойствами, такими как низкая плотность в газообразном состоянии, что вызывает сложности при хранении и транспортировке, и тенденцию к утечкам из-за малой молекулярной массы и широкого диапазона воспламеняемости. Это существенно усложняет его применение из-за высоких затрат и потенциальных рисков безопасности. В поиске альтернатив водороду рассматриваются жидкие добавки к природному газу, обладающие аналогичными положительными характеристиками, но значительно

упрощающие процессы хранения и транспортировки, представляющие простое и экономичное решение в сравнении с газообразным водородом.

Однако использование топлива, физико-химические свойства которого отличаются от свойств обычного топлива, ставит новые проблемы и задачи. В частности, было замечено, что процесс сгорания водорода при определенных условиях может быть аномальным и, следовательно, неоптимальным для достижения эффективности, сравнимой или даже превышающей эффективность традиционных ДВС [7]. Этот аспект представляет большой интерес, особенно в стационарных приложениях: в них фактически используется большое количество энергии, и поэтому высокая эффективность, а также значительное сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу являются ключевыми императивами для достижения производства экологически чистой энергии.

1.1 Водород для устойчивого развития перспективных энергетических систем

Промышленный ландшафт мира находится под постоянным давлением постоянно растущей необходимости сокращения выбросов загрязняющих веществ; в большинстве отраслей промышленности помимо наземных двигателей для производства энергии используется ископаемое топливо. В связи с этим двигатели внутреннего сгорания, использующие ископаемое топливо, производят около 25% мировой электроэнергии и на их долю приходится около 17% мировых выбросов ПГ (парниковых газов) [25]. Чтобы справиться со смягчением последствий изменения климата, как подчеркивается в рекомендациях Парижского (COP21) и Глазго (COP26) климатических соглашений [25], а также с целью резкого сокращения выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов, водород может быть конкретным и реалистичное топливо будущего.

1.1.1 Химико-физические свойства

Если рассматривать водород с чисто химической точки зрения, то это самый простой, маленький и легкий элемент, существующий на Земле. Если присмотреться к его атомной форме, то можно увидеть, что он имеет только один протон и один электрон (рисунок 1), и именно последний, расположенный в валентной зоне, отвечает за его чрезвычайную реакционную способность [27]. Как видно на фазовой диаграмме (рисунок 2), диапазон существования газовой фазы очень широк, тогда как жидкая фаза существует только при очень низких температурах (около абсолютного нуля) [35]; это означает, что для достижения плотности энергии, сравнимой с плотностью энергии ископаемого топлива, и обеспечения надлежащего хранения в относительно компактных объемах, водород требует большой механической работы по сжатию газовой фазы (максимальное давление до 900 бар [16]) или в качестве альтернативы его необходимо охладить до температур, близких к абсолютному нулю [35].

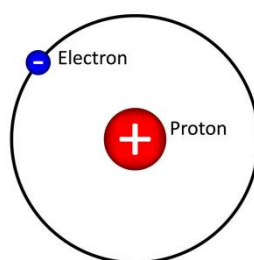


Рисунок 1 – А том водорода [30]

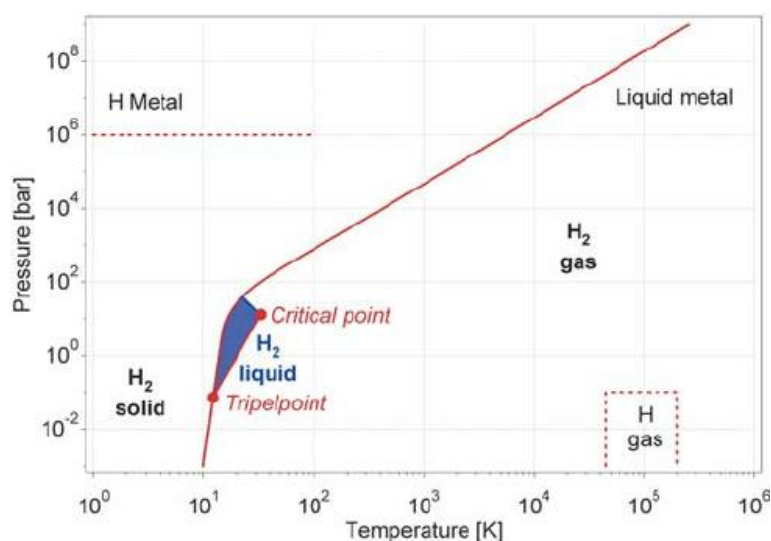


Рисунок 2 – Фазовая диаграмма водорода [35]

В таблице 1 показаны физические свойства водорода в стандартных условиях ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и $p = 1 \text{ бар}$), сравнивая их со свойствами наиболее широко используемого ископаемого топлива.

Таблица 1 – Физические свойства (в стандартных условиях): сравнение традиционных видов топлива и H_2 [27]

Свойство	Бензин	Дизель	CH_4	H_2
Плотность (жидкость) [$\text{кг}/\text{м}^3$]	750-770	820-845	432	70.8
Температура [$^\circ\text{C}$]	15	15	-62	-253
Низшая теплотворная способность [$\text{МДж}/\text{кг}$]	41.4	42.9	50	120
Плотность энергии [$\text{МДж}/\text{дм}^3$]	31.7	35.8	21	8.5
Стехиометрическое соотношение [кг воздуха/кг топлива]	14	14.7	17.2	34.3
Коэффициент диффузии [$\text{см}^2/\text{с}$]	0.05	-	0.16	0.61
Пределы воспламеняемости [%об.]	1-7.6	0.6-5.5	4.4-15	4-76
λ диапазон [-]	1.4-0.4	1.35-0.48	2-0.6	10-0.13
Минимальная энергия воспламенения [МДж]	0.24	0.24	0.29	0.017
Ламинарная скорость пламени [$\text{см}/\text{с}$]	- 40	- 40	- 42	- 230

Одним из наиболее неприятных моментов является то, что водород имеет чрезвычайно низкую плотность жидкости (в 12 раз ниже, чем у дизельного топлива), которая, помимо прочего, достигается в экстремальных температурных условиях. Кроме того, минимальная энергия воспламенения на порядок ниже, чем у других видов топлива, а также очень высокая ламинарная скорость пламени: это связано с чрезвычайной реакционной способностью водорода и создает новые проблемы, связанные с контролем впрыска топлива и сгоранием в приложениях ДВС [8]. С другой стороны, к положительным моментам можно отнести высокую низшую теплоту сгорания, а также широкий диапазон воспламеняемости и соотношения воздух-топливо - параметры, обеспечивающие эффективное сгорание топливно-воздушной смеси, определяющие тем самым высокие КПД в различных условиях эксплуатации.

1.1.2 Процессы производства водорода

Одной из первых проблем, стоящих перед реализацией производства электроэнергии на основе водорода, безусловно, является производство водорода. Фактически, это не только химически самое простое вещество, но

и одно из самых распространенных на Земле, однако из-за своей реакционной способности оно редко встречается в природе в своей молекулярной форме (H_2). Большая часть водорода фактически захвачена в других молекулах, включая воду, жиры, углеводы, белки и углеводороды, и по этой причине необходимо производить его «искусственно», используя определенные химические соединения и соответствующее количество энергии [27].

На рисунке 3 показан обзор реальных методов производства водорода с разбивкой по используемому источнику энергии. Фактически, они классифицируются по степени воздействия на окружающую среду, начиная с традиционных/ископаемых источников, которые оказывают наибольшее воздействие на окружающую среду, проходя через низкоуглеродные источники и заканчивая возобновляемыми источниками: последние являются наиболее перспективными с точки зрения выбросов парниковых газов и по этой причине они постоянно являются объектом исследования.

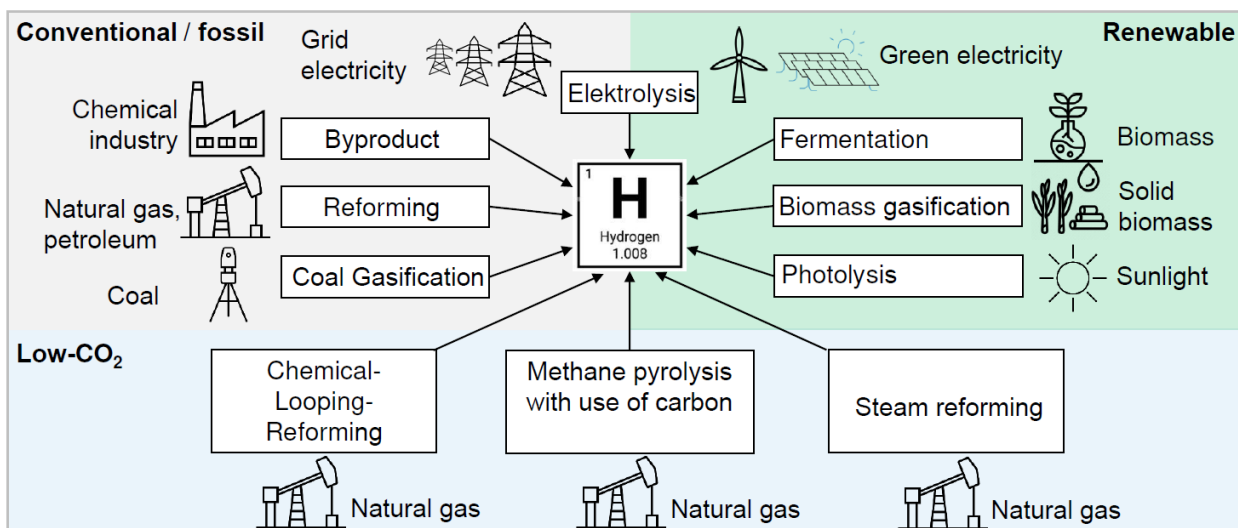


Рисунок 3 – Обзор процессов производства водорода [27]

На рисунке 4 показано распределение наиболее широко используемых веществ для глобального производства водорода. Фактически, в настоящее время почти 50% водорода, производимого во всем мире, производится в процессе паровой конверсии метана; кроме того, на используемый

природный газ приходится около 6% мирового потребления природного газа [8]. Его распространение в основном обусловлено его высоким КПД, около 80%, и стоимостью около 1,50 \$/кг H₂, что относительно мало по сравнению со стоимостью электролитических установок [27, 25].

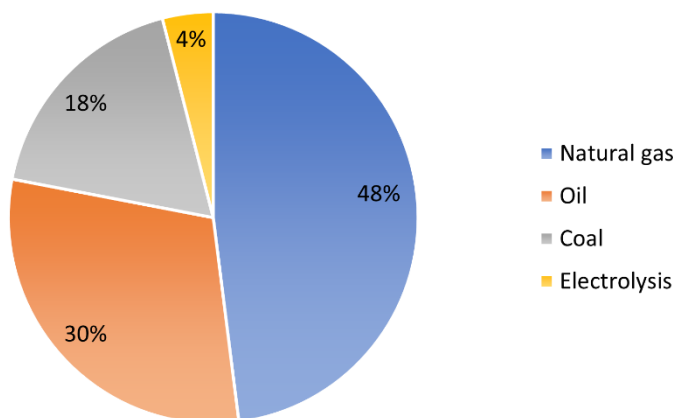
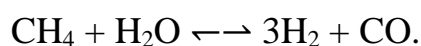
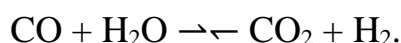


Рисунок 4 – Производство водорода (глобальное) [27]

Процесс SMR происходит путем воздействия на природный газ температуры от 700 до 900 °С и давления от 20 до 40 бар в присутствии каталитического агента (обычно никеля). Реакция, протекающая в этих условиях, следующая:



Это сильно эндотермическая реакция ($\Delta H_{SR} = 206$ кДж/кмоль), для протекания которой требуется много энергии. Затем промышленный процесс продолжается WGS (сдвиг воды и газа); эта равновесная реакция выглядит следующим образом:



Таким образом, окись углерода окисляется до CO₂ и образуется дополнительный водород. После WGS различные химические соединения разделяются через PSA (адсорбер переменного давления) или мембранный

сепаратор, получая водород с очень высокой степенью чистоты [27]. Схема всего процесса SMR показана на рисунке 5.

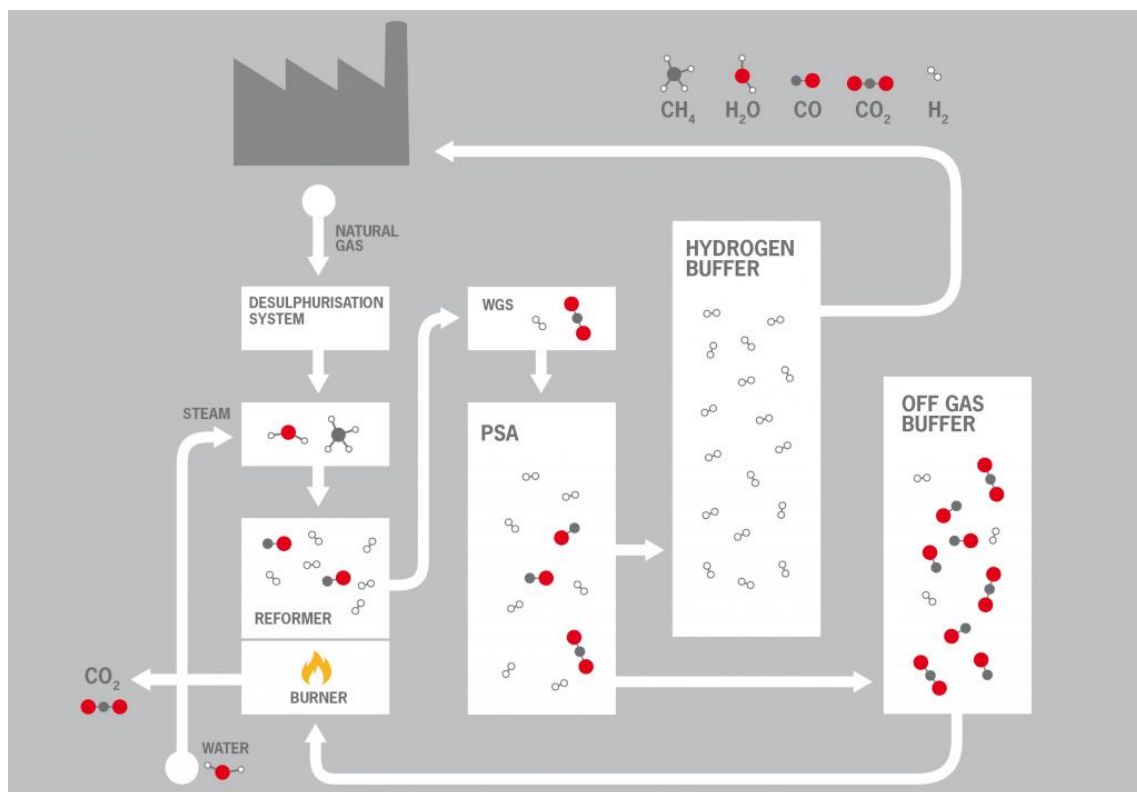


Рисунок 5 – Процесс SMR для производства H₂ [11]

Наряду с паровым риформингом значительное количество водорода образуется также в результате частичного окислительного риформинга и автотермического риформинга: частичный окислительный риформинг — это процесс, используемый в основном для тяжелых углеводородов, таких как побочные продукты нефтепереработки, а также нефти и угля, которые экзотермически реагируют с кислородом при высоких температурах и давлениях ($T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 100\text{ бар}$). В результате получается так называемый синтез-газ, богатый окисью углерода; затем использование реакции WGS приводит к окислению большей части CO до CO₂ и образованию H₂ с эффективностью до 70% и средней степенью чистоты из-за образования сажи в процессе сгорания [27, 25].

С другой стороны, автотермический риформинг представляет собой гибридную технологию двух упомянутых выше: в этом случае тепло

экзотермической реакции процесса частичного окислительного риформинга используется для протекания эндотермической реакции парового риформинга. однако необходимость высокой температуры для протекания реакции приводит к образованию больших количеств оксидов азота, которые трудно удалить при разделении различных газовых фаз [27, 25, 34].

Другая значительная часть водорода, производимого в мире, связана с процессом газификации: по сути, это сжигание в атмосфере с низким содержанием кислорода, которое может осуществляться либо с использованием угля, либо с использованием отходов и биомассы (рисунок б); однако в настоящее время газификация биомассы для производства водорода все еще находится в прототипном состоянии, тогда как использование угля определено более широко распространено. При горении образуется газовая атмосфера, которая при воздействии высокой температуры позволяет диссоциировать углеводороды на различные газообразные соединения, включая водород [27].

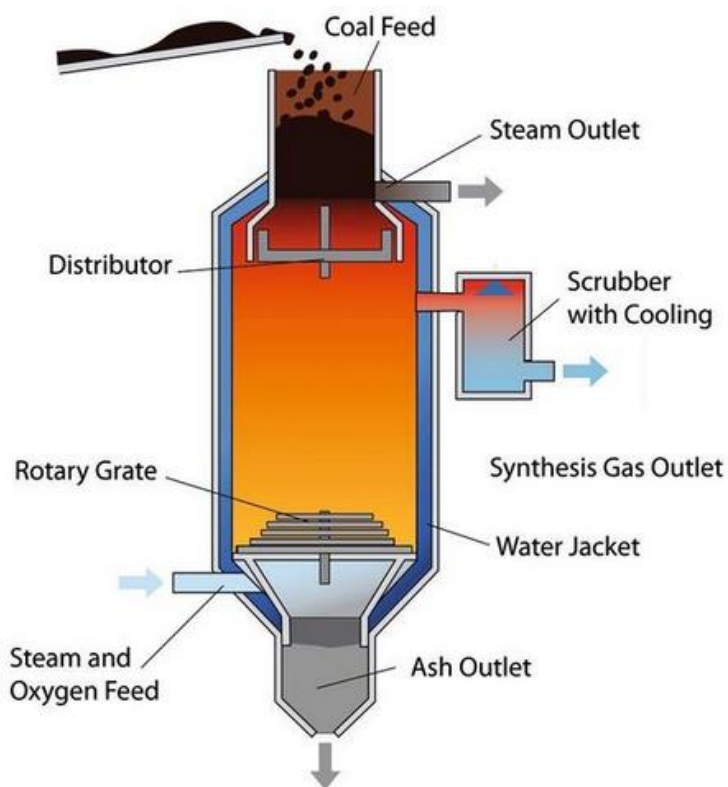


Рисунок 6 – Процесс газификации угля [14]

Этот метод, хотя и относительно недорогой, имеет два основных недостатка: первый – это высокое выделение парниковых газов, а второй – низкая степень чистоты получаемого водорода из-за затрудненного удаления твердых частиц, образующихся при сжигании угля.

Вместо этого, двигаясь к производству так называемого «зеленого» водорода, наиболее перспективной технологией является электролиз (рисунок 7) [34]: этот процесс основан на серии окислительно-восстановительных реакций, которые в основном приводят к разделению молекулы воды на ее основные компоненты в газообразной форме, водород и кислород. Среди нескольких доступных промышленных процессов PEM оказался наиболее удобным.

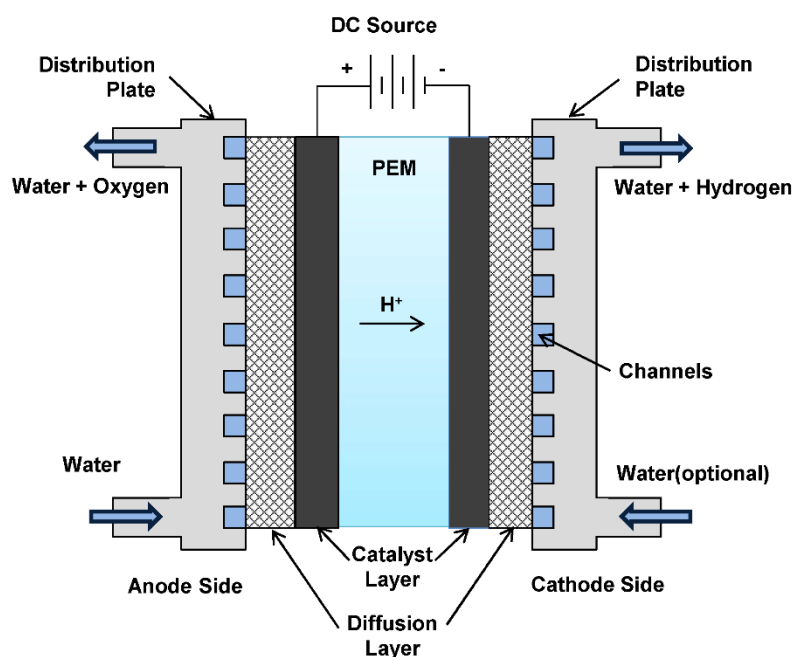
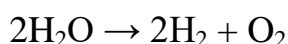
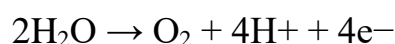
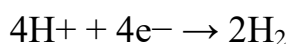


Рисунок 7 – Процесс электролиза PEM [31]



Процесс происходит, как описано на рисунке 7: вода, поступающая на анод, расщепляется, удаляя электроны и образуя ионы водорода; электроны

благодаря электродвижущей силе, подаваемой от внешнего источника постоянного тока, движутся к катоду ячейки и восстанавливают ранее образовавшиеся ионы водорода. Таким образом, фундаментальным компонентом ячейки является проницаемая мембрана, которая разделяет катод и анод, но пропускает ионы водорода. Общая реакция является сильно эндотермической ($\Delta H_{R0} = 286$ кДж/кмоль), и по этой причине требуется большое количество электрической энергии [34, 27]. Эту технологию, безусловно, можно стимулировать за счет более широкого распространения инфраструктур для производства экологически чистой энергии из ветра или фотоэлектрической энергии, используя таким образом водород в качестве энергоносителя, учитывая временный характер этих источников.

1.2 Хранение и распространение водорода

Из-за своей низкой плотности водород представляет собой ряд технических и экономических проблем, требующих решения. Наиболее распространенными способами хранения являются: сжатый газообразный водород, жидкий водород, хранимый при температуре около 20 К, водород в химических соединениях, изучаемых в настоящее время [15].

На рисунке 8 представлен обзор объемной плотности энергии для различных фаз водорода; он ясно показывает, что самые высокие плотности энергии достижимы с жидкой фазой (до 2,3 кВтч/дм³), в то время как газообразная фаза при комнатной температуре и предельном давлении 900 бар имеет плотность всего 1,6 кВтч/дм³. Кроме того, на диаграмме также нанесена необходимая работа сжатия в долях теплоты сгорания водорода (120 МДж/кг). Для сжатия жидкости предполагалось изобарическое превращение, а для газа — изотермическое превращение, оба идеальные. Учитывая относительную эффективность сжатия, составляющую от 30% до 50%, можно видеть, что для хранения требуется большое количество энергии [15].

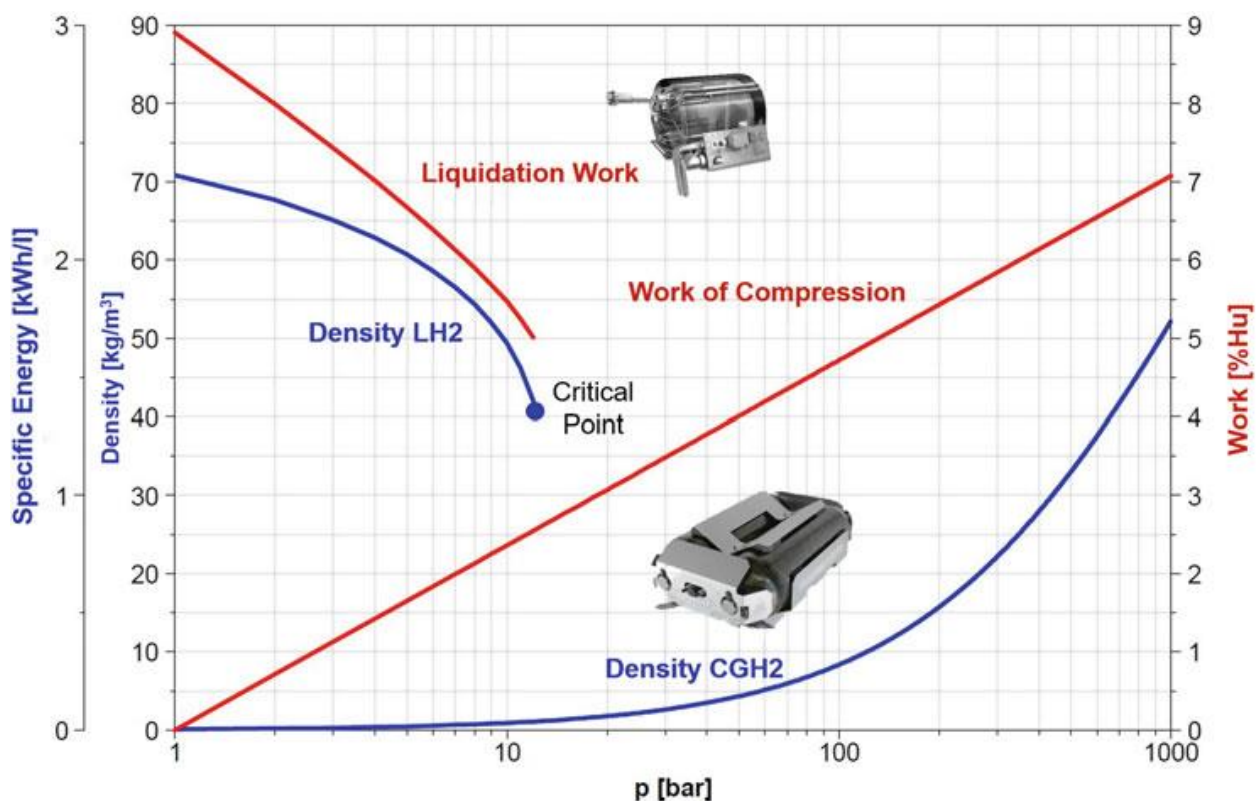


Рисунок 8 – Плотность хранения и работа по хранению водорода [15]

Ситуация также становится еще более сложной, если принять во внимание объемную плотность всей системы хранения; в связи с этим на рисунке 9 сравнивается объемная плотность систем хранения различных видов топлива. Можно отметить два различных аспекта: во-первых, при том же занимаемом объеме энергия, содержащаяся в системе хранения жидкого H_2 , составляет всего 1/6 энергии системы хранения бензина. Не менее интересно отметить, что в случае с жидким H_2 происходит потеря более 50% между плотностью только топлива и всей системы хранения, в случае бензина или, например, СПГ (сжатого природного газа), эта разница гораздо менее заметна. Это может быть оправдано большей сложностью на уровне конструкции всей системы для H_2 , которая, очевидно, также должна включать все соответствующие системы безопасности, необходимые при работе с очень реакционноспособным и легковоспламеняющимся веществом, таким как водород [15].

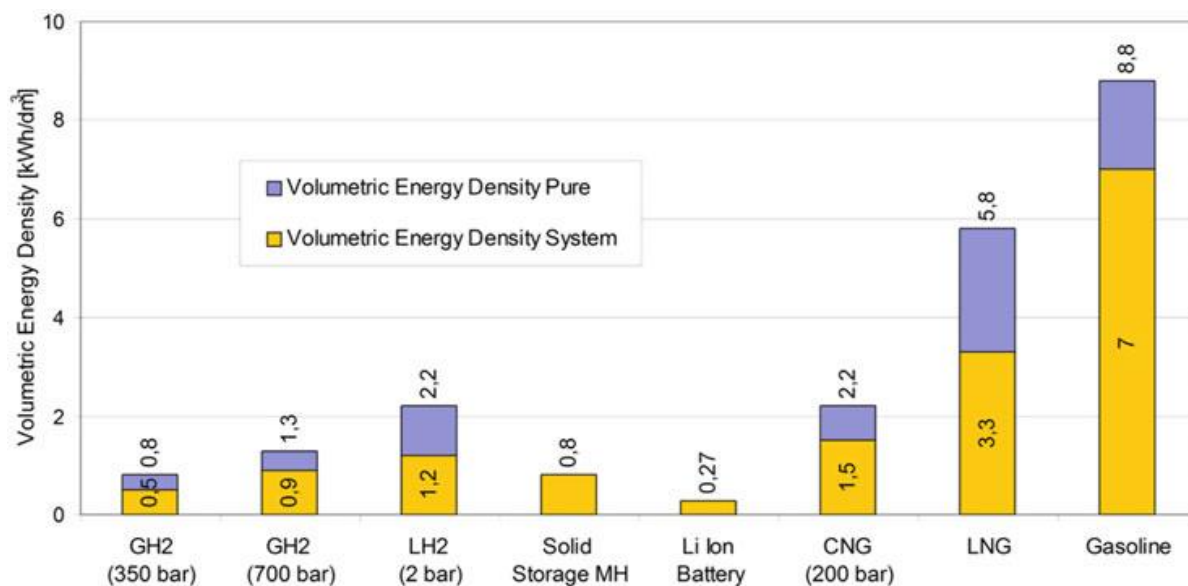


Рисунок 9 – Объемная плотность энергии систем хранения [15]

Чтобы подвести итоги по водороду, интересно также высказать некоторые соображения экономического характера с учетом будущих разработок. В этом отношении рисунок 10 ясно подчеркивает причину, по которой 96% водорода, производимого в мире, по-прежнему производится из ископаемого топлива, и это, очевидно, аспект, связанный с затратами [9].

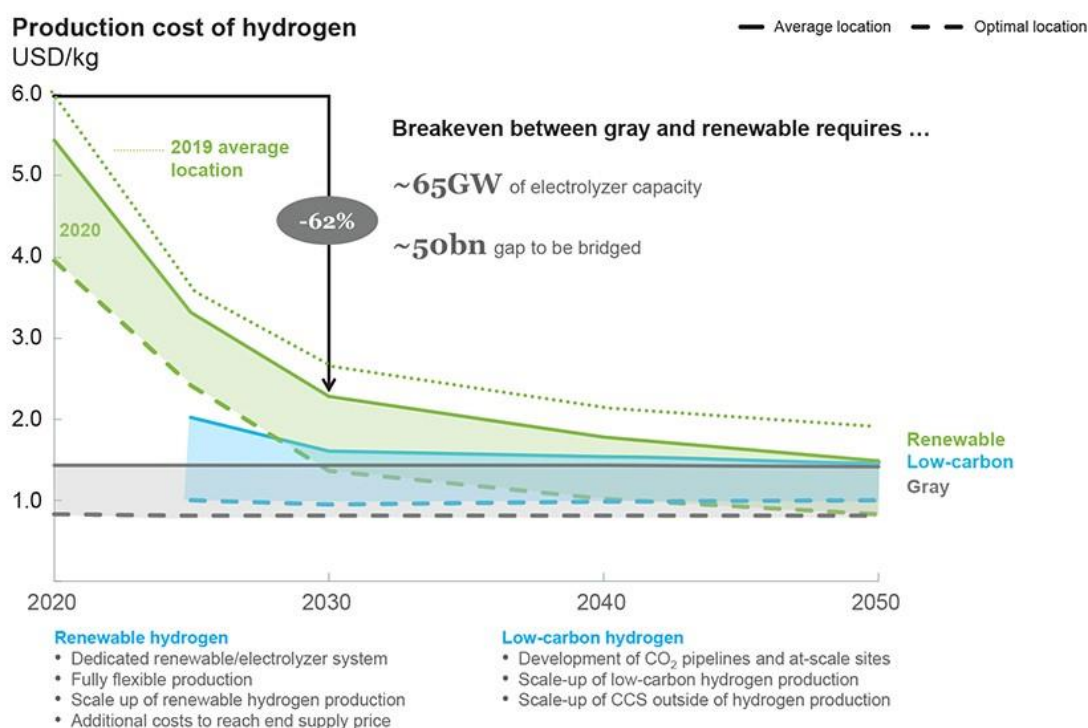


Рисунок 10 – Себестоимость производства водорода [5]

Однако показан положительный прогноз в пользу «зеленого водорода» с сокращением затрат на 62% в период между 2020 и 2030 годами. Несмотря на это, разрыв по сравнению с традиционными и низкоуглеродными технологиями все еще кажется слишком большим и трудным для заполнения в краткосрочной перспективе. Тем не менее, увеличение количества исследовательских проектов, использующих водород как устойчивый источник энергии, в долгосрочной перспективе может привести к повышению его заметности и, как следствие, к дальнейшему снижению его средней стоимости на рынке.

1.3 Применение водорода для повышения характеристик горения природного газа

1.3.1 Детонация в двигателе

Атипичные феномены горения, такие как детонации в двигателях с искровым воспламенением, могут проявляться в виде самовоспламенения и искровой детонации, а также детонации, вызванной горячим поверхностным зажиганием. Самовоспламенение топлива инициируется автоматически при определенных условиях, обычно, когда давление в камере сгорания превышает 10 бар, а температура составляет более 400°C. Это приводит к интенсивным флуктуациям давления внутри цилиндра, как демонстрируется на приведенном изображении. В отличие от этого, искровой стук характеризуется как серия регулярных и аудибельных стуков. Детонация, спровоцированная горячей поверхностью, обусловлена взаимодействием воздушно-топливной смеси с перегретой поверхностью внутри камеры сгорания. Детонация при поверхностном воспламенении может возникнуть до того, как искра зажжет заряд, или после того, как искровое пламя прошло [4]. На детонацию искры влияет момент зажигания.

Длительная эксплуатация с сильными детонациями, искрами или поверхностным возгоранием может привести к быстрому повреждению

двигателя. На рисунке 11 показано, чем событие самовоспламенения отличается от события контролируемого горения.

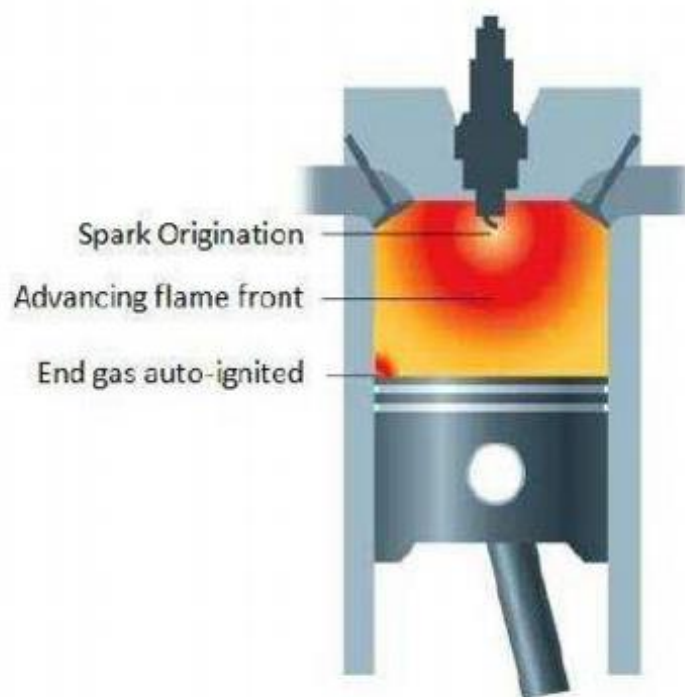


Рисунок 11 – Самовоспламенение отходящих газов, приводящее к детонации двигателя.

Контролируемое горение происходит, когда пламя, инициированное искрой (большая красная зона на иллюстрации 11), распространяется и достигает крайней точки горючего газа перед моментом самовоспламенения. На иллюстрации 12 демонстрируется влияние детонации на параметры давления внутри цилиндра силового агрегата [5]. Резкие изменения вызывают значительное ускорение роста давления. Этот процесс увеличения давления можно охарактеризовать как временную производную отображенных кривых. Подобное ускоренное нарастание давления крайне негативно сказывается на состоянии поршневых колец двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что приводит к уменьшению их эксплуатационного срока [6].

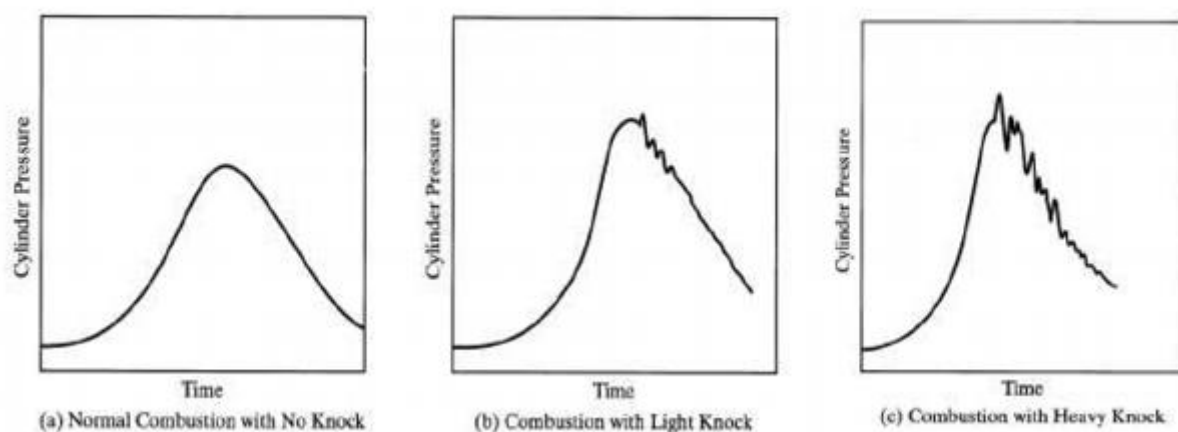


Рисунок 12 – Графики давления в цилиндре, которые увеличивают детонацию слева направо в зависимости от времени в двигателе с искровым зажиганием.

1.3.2 Прогрессивные двигатели на основе компрессионного зажигания

Присадки к бензину могут играть ключевую роль в адаптации характеристик топлива под нужды будущих передовых ACI (Advanced Compression Ignition) двигателей. Новаторские подходы к ACI, такие как HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), PCCI (Premixed Charge Compression Ignition) и RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition), разработаны для улучшения химико-кинетических процессов самовоспламенения топливно-воздушной смеси, будь то полностью предварительно смешанная или с частичной предварительной смешанностью. Вызовы, связанные с этими технологиями, включают сложность контроля за точкой воспламенения в различных условиях эксплуатации и, в некоторых случаях, как в HCCI, риск повышенного быстрого нарастания давления. Особую проблематику представляет RCCI, требующий использования двойного топливного заряда (дизель/бензин). Однако технология RCCI показала значительный потенциал в повышении эффективности и контроля над двигателем. Интеграция присадок в небольших количествах позволяет модифицировать свойства одиночного топлива, облегчая достижение подобных преимуществ, за исключением

необходимости хранения двух разных топлив. Таким образом, акцент в изучении роли присадок к бензину также направлен на оценку их способности модифицировать реактивность топлива для его использования в АСІ-двигателях.

1.3.3 Ранее проведенные добавочные исследования в CSU

Здесь обсуждается исследование, проведенное в рамках широкомасштабного проекта Колорадского государственного университета (CSU), посвященное анализу воздействия топливных присадок на двигатели. В рамках этой работы были проведены как теоретические, так и практические исследования процессов сгорания, в частности, с помощью устройства быстрого сжатия газовой смеси CSU (RCM). Эксперименты с RCM показали, что добавление определенных присадок к топливу может способствовать достижению положительных эффектов, таких как увеличение предела стабильной работы двигателя на обедненных смесях, природного газа, улучшение реактивности бензина и прочее. Механизм работы CSU RCM основан на использовании пары поршней для быстрого сжатия газообразной смеси до состояния высоких давления и температур с последующим удержанием поршней в таком положении, что дает возможность анализировать химическую кинетику при высоких температурных условиях. Подробности доступны в дополнительных источниках. В частности, испытания показали, что применение присадок в природном газе помогает снизить минимально необходимую энергию для зажигания и расширить границы возможности использования обедненной смеси, как показано на графике, где по оси абсцисс отмечен коэффициент эквивалентности смеси, а по оси ординат – общая эффективность сгорания, определяемая как соотношение выделившейся энергии к исходному энергетическому содержанию топлива. Экспериментальные условия были стандартизированы по входной энергии для обеспечения удаления необходимости коррекции полученных данных, где вход энергии включает в себя энергетические

значения исходного топлива и незначительные добавки от дополнительных источников, включая энергию от вспышки зажигания.

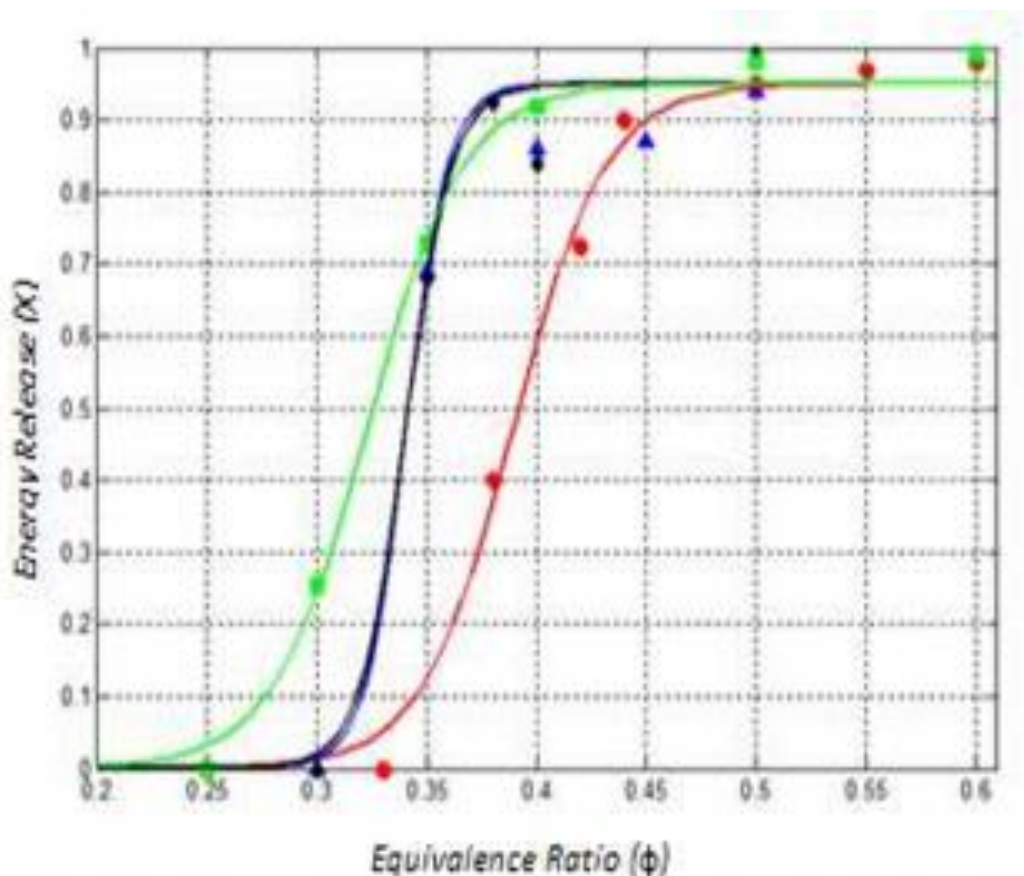


Рисунок 13 – Характеристика тепловыделения (X) при различных значениях коэффициента стехиометрии для смесей метан/воздух, инициированных с помощью лазерного возбуждения [12].

Проведение испытаний с зажиганием при помощи лазера позволило точно определить энергетические параметры инициирования процесса горения. Отмечается, что показатели эффективности горения не достигают полного значения, максимизируясь примерно на 0.95 от максимально возможного из-за недостаточности процесса сгорания. Проанализированные графики демонстрируют различие в характеристиках горения смесей: основной метан/воздух (обозначен красным цветом) и смеси, модифицированные добавлением ди-третбутилпероксида (DTBP), нитрометана (NM) и диметоксиметана (DMM), которые изображены зеленым, синим и черным цветами соответственно, с увеличением их

энергетического содержания на 1%. Внедрение этих добавок способствует улучшению выработки энергии в условиях обедненных смесей. В частности, эталонная смесь метан/воздух показывает 90% эффективность при коэффициенте эквивалентности 0,45, в то время как добавление определенных аддитивов (например, показанных синим и черным) позволяет достигнуть аналогичной эффективности при коэффициенте 0,37, что эквивалентно сокращению потребления топлива на 17.7% для получения того же количества энергии. Исследование с использованием метода RCM подтверждает потенциал этих добавок в расширении границ использования обедненных смесей природного газа. Однако RCM представляет идеализированные условия, не учитывающие многие аспекты реального процесса горения, такие как завихрения, остаточные газы, температурные различия, турбулентность и т.д. В отличие от RCM, в реальных условиях двигателя, например, в CFR-двигателе, границы обедненных смесей определяются исходя из изменений давления от цикла к циклу, что более чувствительно к скорости распространения пламени, чем общая эффективность сгорания в RCM.

График на рисунке 14 демонстрирует влияние присадок к бензину на задержку воспламенения топлива в условиях камеры сгорания с быстрым сжатием (RCM). В исследованиях определение момента зажигания при использовании бензина с добавками происходит по времени между достижением поршнем центральной точки в камере сгорания RCM и моментом, когда начинается самовоспламенение, что характеризуется пиком скорости роста давления. Рисунок 14 представляет зависимость задержки воспламенения от сжатой температуры, отображенную в виде графика Аррениуса, где период задержки изображен в логарифмическом виде, а температура представлена через обратное значение ($1000/T$), располагая высокие температуры слева, а более низкие справа. В представленных исследованиях давление колеблется в диапазоне от 19 до 28 бар, температура же изменяется от 655 до 870 К.

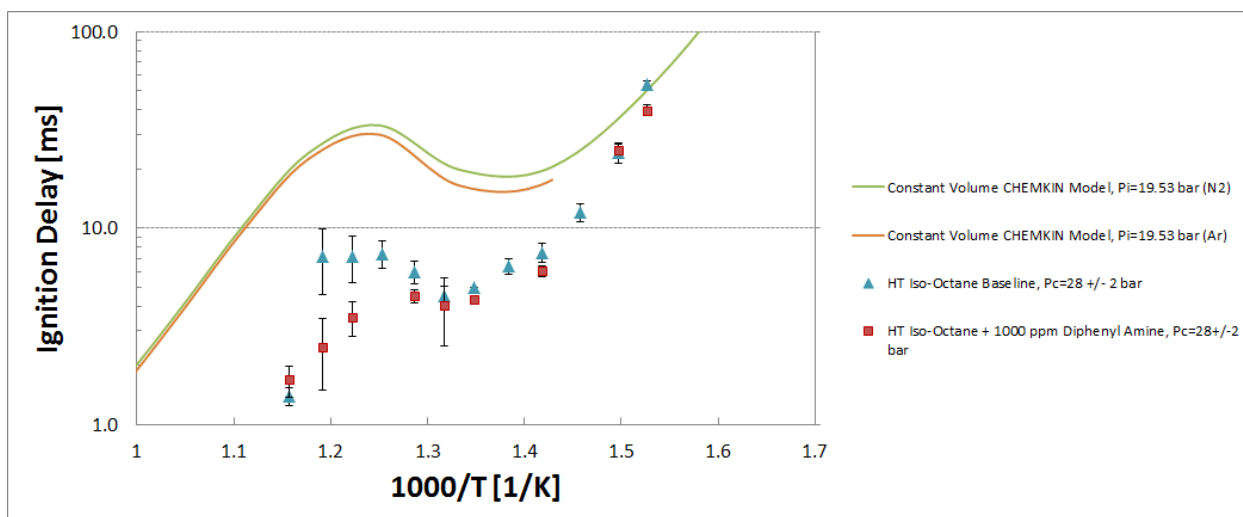


Рисунок 14 – Температура сжатия и задержка воспламенения в случае стехиометрических смесей изооктана с кислородом и инертными газами (отмечены синими треугольниками) по сравнению с аналогичной топливной смесью, обогащённой дифениламином в количестве 1000 ppm (представлены красными квадратами). Параметры экспериментального сжатия охватывают диапазон давлений от 19 до 28 бар и температур от 655 до 870 К. Зелёные и оранжевые кривые показывают результаты моделирования с использованием программного обеспечения CHEMKIN, основанного на детальной химической кинетике.

Зеленые и оранжевые кривые демонстрируют результаты, полученные с использованием программного комплекса CHEMKIN для изохорного процесса с применением детализированной химической кинетики, выполненные при разнообразии начальных условий таких как температура и двух значениях начального давления. Введение добавки при низких температурных показателях не показало значимого воздействия на исходные показатели. Однако, при повышении температуры, активатор начинает значительно влиять на время задержки самовоспламенения. В диапазоне температур от 760К до 870К дифениламин сокращает время ожидания воспламенения.

1.4 Водородные двигатели внутреннего сгорания

1.4.1 Важность головки блока цилиндров

При работе ДВС на водороде головка блока цилиндров является одним из наиболее важных компонентов двигателя, оказывающим существенное влияние на: работу двигателя, вырабатываемую мощность и крутящий момент, расход топлива, выбросы и акустику [23, 3]. Он выполняет ряд основных функций, среди которых:

- герметизация камеры сгорания сверху;
- корпус седел клапанов и направляющих клапанов;
- корпуса форсунок и/или свечей зажигания;
- обеспечение адекватного охлаждения частей, наиболее подверженных воздействию фронта пламени при сгорании смеси;
- Корпус каналов для смазки движущихся частей.

Таким образом, этот компонент подвергается нагрузкам различного рода, например: статическим нагрузкам из-за принудительного соединения седел клапана и направляющих, а также напряжениям из-за предварительного натяжения винтов, герметизирующих головку цилиндра; решающее значение имеют также динамические нагрузки из-за циклически изменяющегося давления в камере сгорания и из-за постоянного изменения температуры из-за высоких температурных градиентов. И последнее, но не менее важное: коррозионный эффект, оказываемый дымовыми газами, что особенно актуально в случае сгорания водорода, поскольку вода оказывает крайне негативное воздействие на черные материалы.

1.4.2 Аномальные явления горения

Многие научные исследования, например, проведенные в [2], [7] и [13], подчеркнули влияние аномальных явлений сгорания на снижение эффективности, надежности и срока службы двигателей ДВС. Ниже представлен обзор основных аномальных явлений горения в конкретном случае водорода, а также причины, по которым они происходят, и возможные

стратегии по смягчению их и их последствий. Также учитываются основные оптические системы доступа, поскольку они часто используются в исследовательских целях в области горения.

Первая серьезная проблема связана с преждевременным зажиганием: это особое явление, заключающееся в раннем воспламенении топливовоздушной смеси; по определению, это происходит, когда и впускной, и выпускной клапаны закрыты (т.е. во время такта сжатия). На основании ряда проведенных исследований отмечено, что оно имеет место там, где одновременно присутствуют высокие температуры и местами слишком богатая смесь [25];

Более конкретно, на рисунке 15 проведены два разных испытания двигателя с одинаковой частотой вращения двигателя 2000 об/мин и коэффициентом избытка топлива 0,5 (богатая смесь). Первое испытание (две цифры вверху) выявило появление преждевременного зажигания примерно при угле поворота коленвала 150 градусов до верхней мертвой точки (до верхней мертвой точки) с быстрым увеличением давления в цилиндре по сравнению с нормальной работой. Чтобы исследовать основную причину, был проведен анализ CFD (вычислительная гидродинамика), такой как анализ справа на рисунке 15, который показал, что на это поведение сильно влияет распределение заряда внутри камеры сгорания: когда заряд расслаивается, то более вероятно преждевременное зажигание, особенно вокруг выпускных клапанов и электродов свечей зажигания.

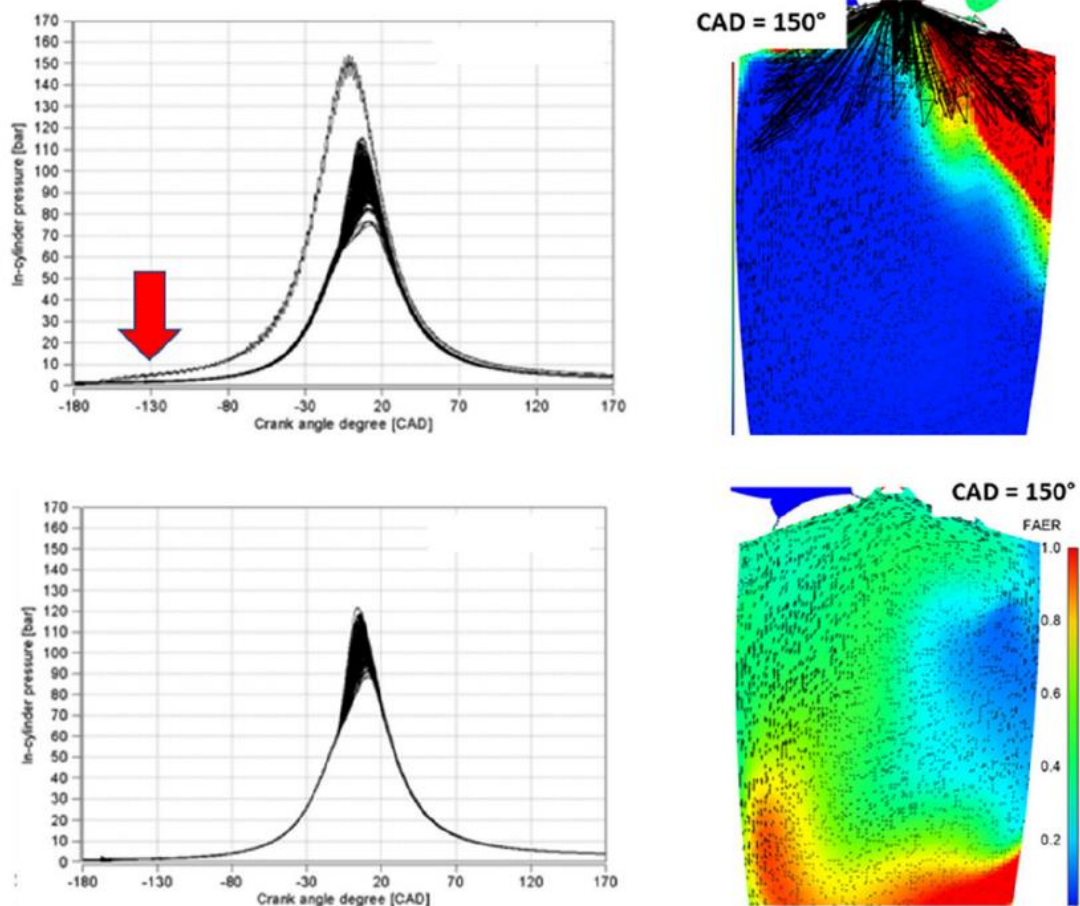


Рисунок 15 – Влияние распределения топлива на возникновение преждевременного зажигания [25]

Чтобы решить эту проблему, безусловно, можно поработать над аэродинамикой камеры сгорания, например, над увеличением турбулентности; более того, можно сосредоточиться на стратегии и времени впрыска топлива; цель состоит в том, чтобы получить высококачественную, однородно распределенную воздушно-топливную смесь, которая, безусловно, менее склонна к преждевременному возгоранию. [25] Кроме того, другой приемлемой стратегией может быть уменьшение количества горячих точек за счет использования холодных свечей зажигания или даже введения специального охлаждения поршня и специальной смазки [25].

С другой стороны, обратный эффект – это несколько иное явление. По определению, это аномальное преждевременное воспламенение топливно-воздушной смеси во время цикла газообмена, и оно может возникать как в камере сгорания, так и во впускном коллекторе. Это связано с уменьшенным

расстоянием тушения водородом и его чрезвычайно малой энергией воспламенения: при локальном обогащении смеси в камере сгорания пламя может распространяться даже через очень малые зазоры обратно во впускной коллектор, вызывая значительные повреждения системы впуска в относительно короткие периоды времени. Исследование, проведенное в Институте двигателей внутреннего сгорания при ТУМ на H₂-ДВС с оптическим доступом большого диаметра, показало, что одним из факторов, больше всего влияющих на обратное воспламенение, является противодействие выхлопных газов [7].

На рисунке 16 начало впрыска изменяется с шагом 60° угла поворота коленчатого вала, и для каждого значения противодействие постепенно увеличивается до тех пор, пока не произойдет первый обратный удар. Чем выше достигнутое противодействие, тем меньше точка начала впрыска подвержена обратному пуску. Это показывает, что лучший момент впрыска — это угол поворота коленвала 300°; по мнению [7], вероятно, это связано с расслоением заряда во впускном коллекторе. Поскольку впускные клапаны открываются только после впрыска, перед впрыскиваемым облаком водорода образуется воздушная подушка; попадая первым в камеру сгорания, это небольшое количество воздуха снижает температуру поверхностей камеры сгорания, тем самым снижая риск обратного воспламенения.

Напротив, впрыск при угле поворота коленчатого вала 480° очень склонен к неприятным последствиям. В этом случае впрыск происходит, когда впускные клапаны еще закрыты; скорость потока такова, что расслоение шихты не достигается, и, таким образом, контакт между шихтой и выхлопными газами вызывает обратное возгорание за счет термического воспламенения. Этот факт также приводит к гипотезе, что данное явление следует отнести за счет горячих газов вокруг выпускного клапана, а не за счет горячих поверхностей [7].

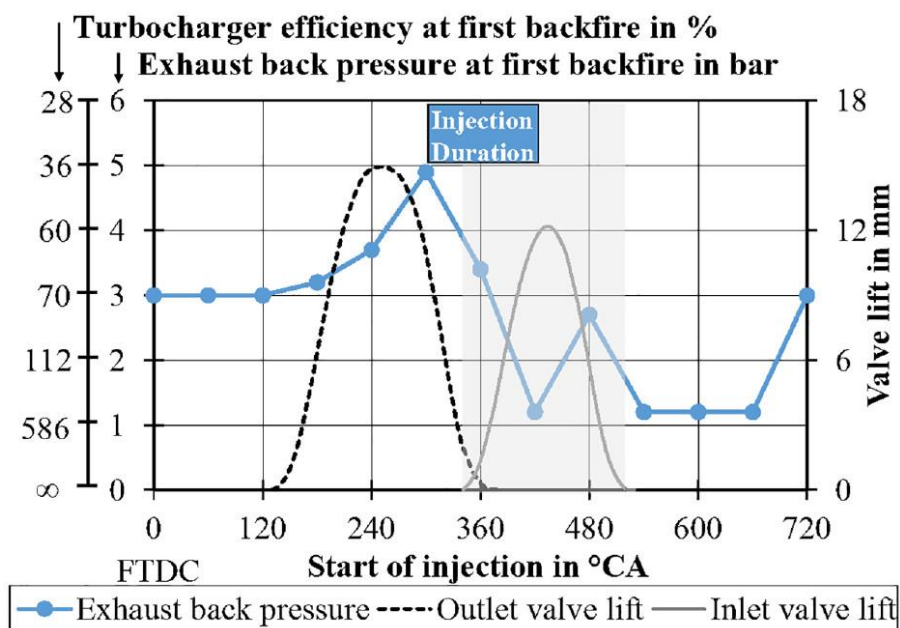


Рисунок 16 – Влияние противодавления выхлопных газов на возникновение обратного пламени [7]

Возможная стратегия, которая может быть принята для решения этой проблемы, — это использование DI и менее богатой топливовоздушной смеси, увеличивающей количество воздуха, подаваемого в двигатель. Фактически, по сравнению с современным классическим бензиновым двигателем, эквивалентный водородный двигатель может потреблять более чем на 50% больше воздуха, что требует подходящей системы наддува (возможно, двухступенчатой) для подачи нужного количества воздуха в двигатель. впуска и достичь выходной мощности, сравнимой с обычным ДВС. Оптимизация фаз газораспределения и повышение эффективности наддува также могут оказать положительное влияние на возникновение обратного сгорания, определяя, соответственно, лучшее расслоение заряда и снижение температуры выхлопных газов. В конечном итоге можно рассмотреть и снижение степени сжатия, но с учетом неизбежного ухудшения процесса сгорания.

Глава 2 Введение водорода для улучшения качества сгорания природного газа

В научных публикациях редко встречаются альтернативы водороду как аддитивы к метану. Это может быть обусловлено экономической доступностью метана как топливного ресурса, снижающей мотивацию к улучшению топливной эффективности газовых двигателей. Следовательно, данное диссертационное исследование занимает нишу в академическом дискурсе, посвященную изучению жидких добавок к метану, о чем свидетельствует ограниченный объем предыдущих научных работ по этой теме.

Водород является ключевым компонентом для работы двигателей на обедненных смесях, позволяя им поддерживать высокие показатели мощности даже при значительно сниженных значениях стехиометрического коэффициента. Эффект улучшения производительности двигателя за счет введения водорода подтвержден многочисленными научными работами, что свидетельствует о его положительном влиянии на способность двигателя эффективно функционировать на обедненных смесях. В частности, Ма и его коллеги выявили, модифицируя 6-цилиндровый газовый двигатель для впрыска водорода, что доля водорода в смеси напрямую влияет на увеличение допустимого диапазона обедненных смесей, что подтверждается графиками в их исследовании. Таким образом, применение водорода не только улучшает экологические показатели двигателя, но и способствует его экономичности. Это хорошо видно на рисунке 17 [21]. Добавление водорода обеспечивает более экономичную работу двигателя.

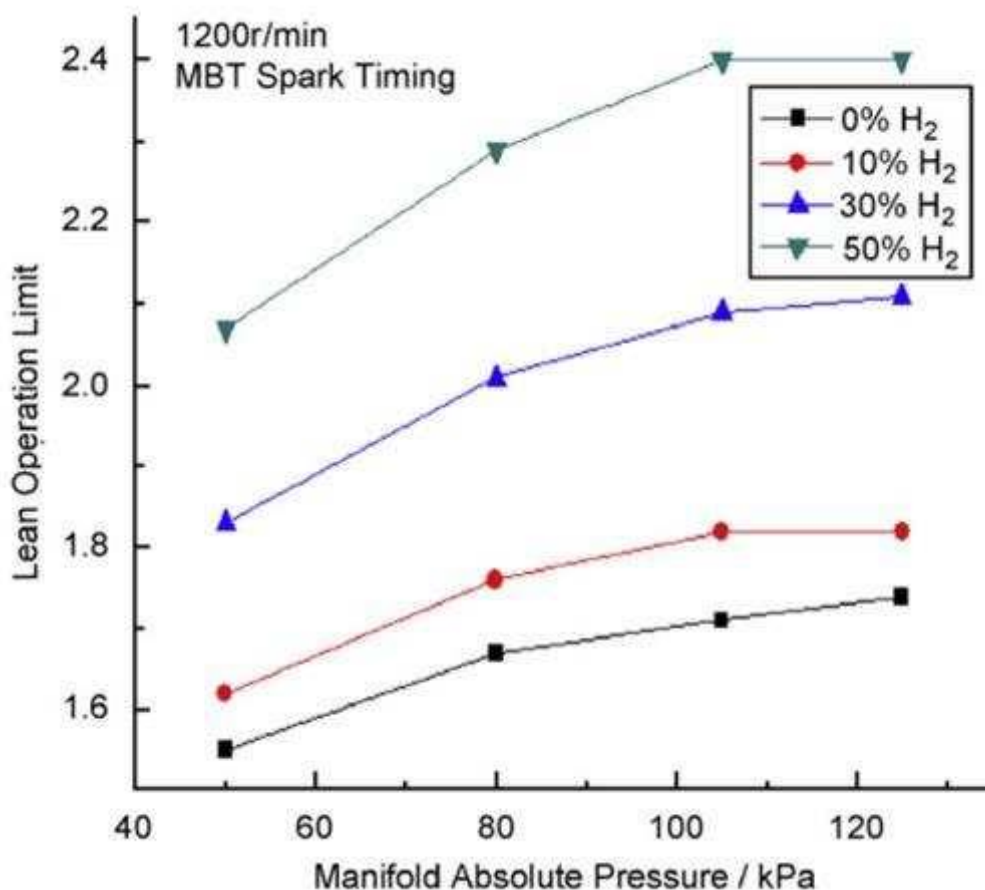


Рисунок 17 – Порог недостаточно обогащённой смеси метан/воздух/водород в 6-цилиндровом двигателе на природном газе с системой впрыска водорода, варьирующийся в зависимости от давления во впускном коллекторе.

На рисунке 17 демонстрируется граница эксплуатации двигателя на обедненной топливе (определенная через коэффициент избыточного воздуха) и её корреляция с манометрическим давлением. Расширение спектра работы двигателя на обедненных смесях, как отображено, указывает на повышенную эффективность использования топлива при уменьшенном его количестве. Согласно представленной графике, при легком повышении над уровнем моря (манометрическое давление равно 105 кПа), коэффициент для обедненной смеси природного газа достигает значения 1,68, и этот показатель продолжает расти с увеличением содержания водорода в смеси. Например, при добавлении 10% водорода к топливу, граница экономичного использования топлива возрастает на приблизительно 3%, и продолжает увеличиваться до достижения 50% водорода в топливной смеси, что

приводит к увеличению этой границы на 10%. Данные указывают на значительное влияние водорода на увеличение эффективности работы двигателя на обедненной смеси природного газа.

На рисунке 17 иллюстрируется, как даже малые объемы водорода могут значительно повлиять на нижний предел воспламеняемости природного газа, в то время как при увеличении его концентрации наблюдается еще более существенное воздействие. Учитывая, что эффект от введения водорода в процесс сгорания природного газа в двигательных системах подробно рассмотрен в научных работах, и он оказывает заметное влияние, то результаты, предложенные в данной научной работе, будут анализироваться с позиции сравнения влияния водорода. В дополнение к литературному обзору, представлены сравнительные данные с результатами новаторских экспериментов, выполненных на CFR установке с применением водорода как добавки к природному газу.

Водород представляет собой ресурс, способствующий ускорению распространения турбулентного пламени в двигателе, что начинается после инициирования искры. Это высокое значение скорости распространения пламени ведёт к более полному процессу сгорания, увеличению скорости нарастания давления в цилиндре и, как следствие, к повышению средних объемных температур к концу процесса сгорания. Проблема неконтролируемого увеличения давления может вызвать детонацию двигателя, что приводит к его повышенному износу. Однако, конструкция двигателя, адаптированная под высокие темпы нарастания давления, позволит эффективно использовать потенциал водорода, минимизируя риск механических повреждений. Рисунок 18, заимствованный из источника [22], демонстрирует временные интервалы горения от момента зажигания до достижения 10% обгоревшей массы в соответствии с коэффициентом избытка воздуха, проводя сравнение между метаном и его смесями с водородом. Анализируя фрагмент графика MFB 0-10% от 32 СА, можно заметить, что метан достигает нужной скорости горения при коэффициенте

избытка воздуха, равном 1,55, тогда как для достижения той же скорости горения топливной смесью, на 50% обогащённой водородом, требуется значение 2,07.

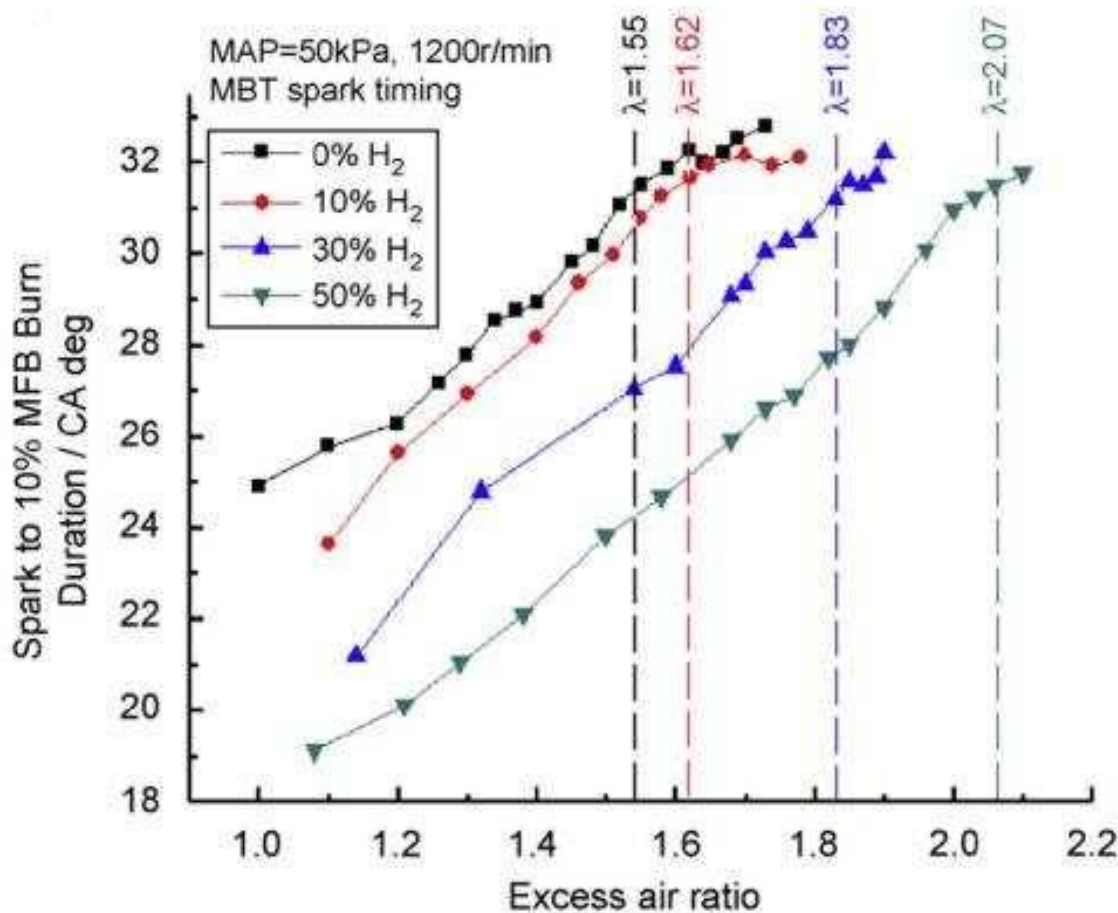


Рисунок 18 – Зависимость времени от искры до достижения 10% массового долевого сгорания (MFB) от соотношения избыточного воздуха для газовых смесей, содержащих метан и водород. Внедрение водорода способствует сокращению интервала времени от момента подачи искры до 10% MFB.

Добавление водорода к топливной смеси не только повышает предел обедненной смеси и ускоряет скорость распространения пламени, но и значительно увеличивает пиковое давление в цилиндре двигателя. Этот эффект объясняется более высокой скоростью горения и температурой сгорания водорода по сравнению с чистым метаном, что напрямую влияет на повышение пикового давления. Так, в условиях, близких к

стехиометрическому соотношению, наблюдается увеличение давления на 500 кПа по сравнению с метановыми двигателями. В условиях высокого обеднения (с коэффициентом избытка воздуха 1,6) разница в давлении может достигать от 500 до 1000 кПа, что эквивалентно увеличению на 20% до 30% при добавлении 20% водорода. Таким образом, водород значительно повышает показатели давления в двигателях на природном газе.

Значимые научные работы были посвящены анализу эффекта, производимого внедрением водорода в систему сгорания, на операционную надежность двигателя (см. рисунок 19). Введение водорода в топливную смесь вызывает повышение максимального давления в цилиндрах по сравнению с работой на чистом метане. Эффект от использования водорода становится более заметным при уменьшении топливной насыщенности смеси. Один из методов анализа этого влияния заключается в наблюдении за изменениями максимального давления от цикла к циклу, используя показатель коэффициента вариации (COV), который вычисляется как отношение стандартного отклонения к среднему значению и выражается в процентах. Минимальные колебания давления, выраженные через низкий COV, свидетельствуют о стабильной работе двигателя. Применение CALC позволяет качественно анализировать изменчивость различных характеристик работы двигателя. Другой метод контроля устойчивости функционирования двигателя связан с определением доли рабочих циклов, во время которых происходят пропуски в зажигании. Пропуски связаны со значительным снижением выходной мощности за цикл или с неполным воспламенением смеси, что может быть обусловлено рядом причин, включая недостаточное поступление топлива или воздуха, а также неисправностью свечей зажигания. Тем не менее, анализ доли пропусков зажигания особенно актуален для двухтактных двигателей, поскольку именно в них пропуски зажигания наблюдаются чаще.

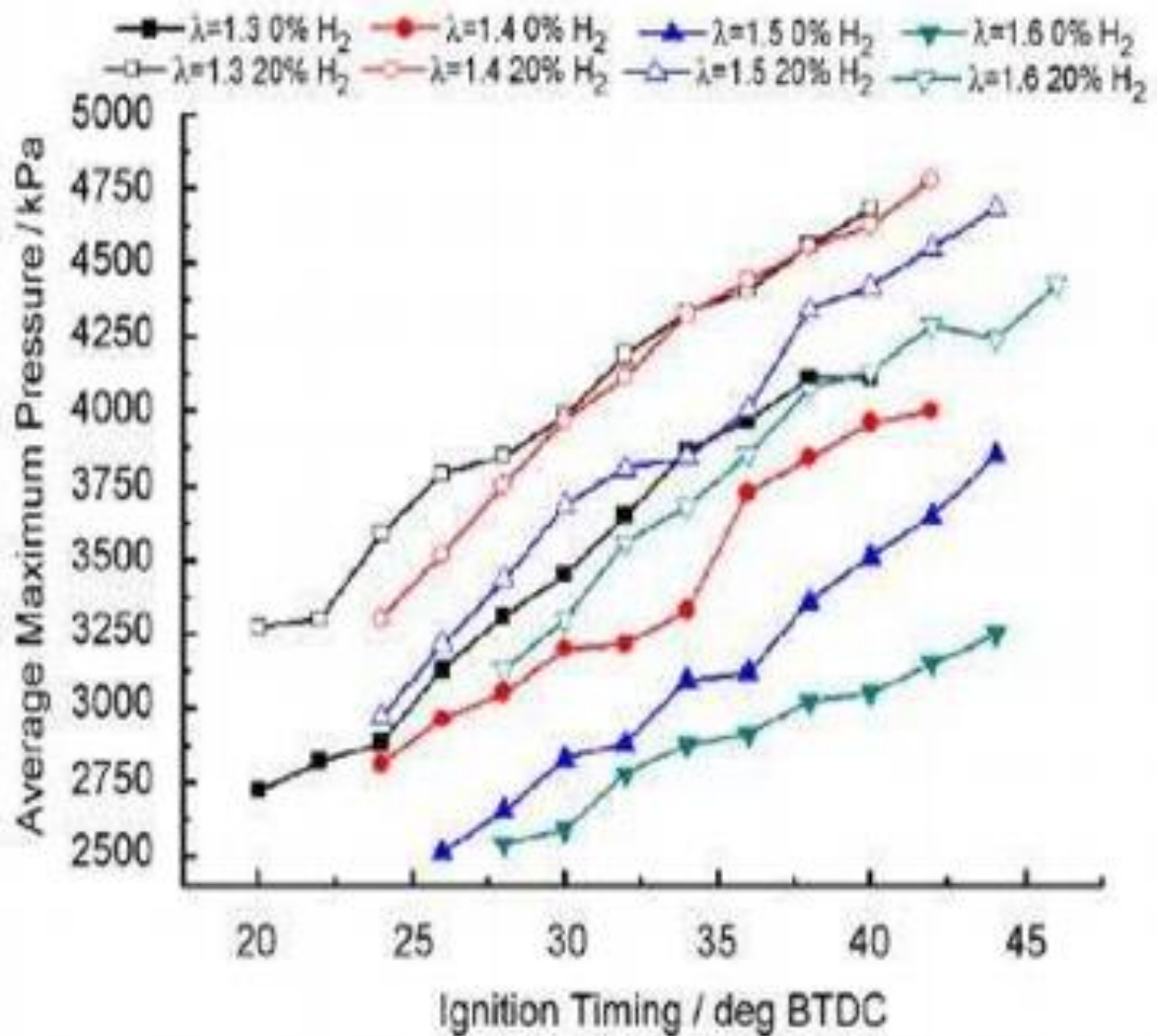


Рисунок 19 – Влияние водорода и угла опережения зажигания на среднее максимальное пиковое давление в цилиндре.

Изучение, проведенное Ма и описанное в источнике [26], рассматривало влияние добавления водорода к природному газу на работоспособность двигателей. Результаты показали, что водород способствует повышению стабильности работы и эффективности 4-тактных двигателей (рисунок 20) [27].

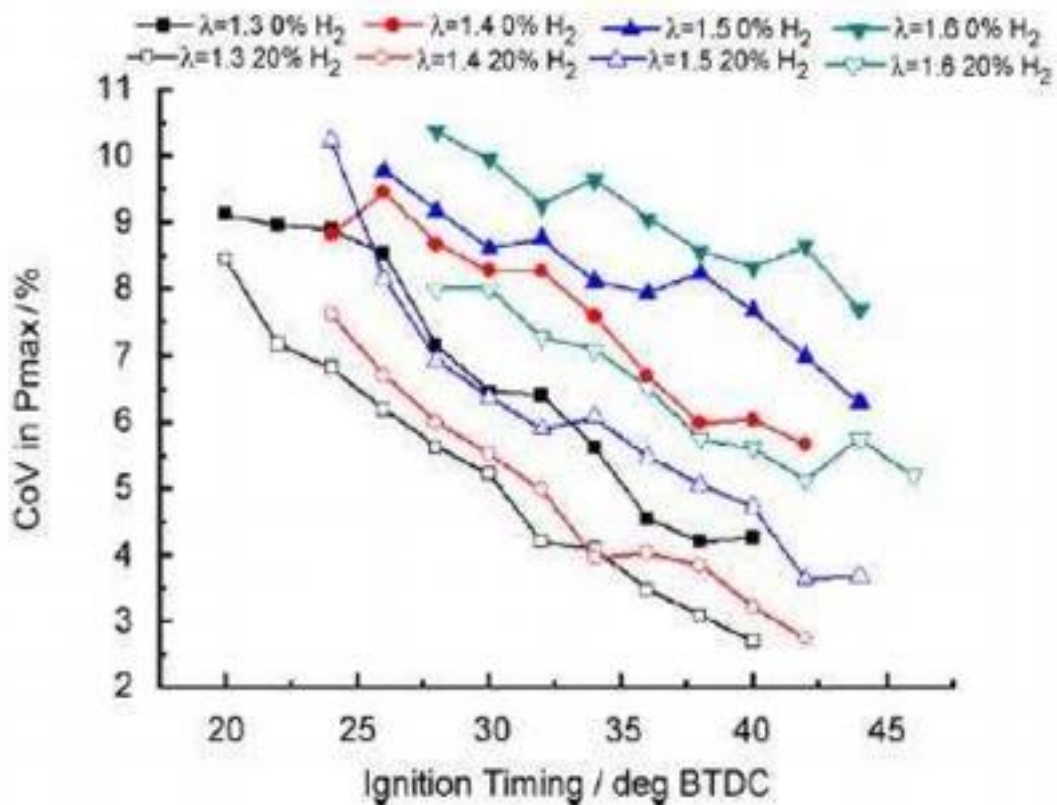


Рисунок 20 – Влияние водорода и момента зажигания на коэффициент вариации пикового давления [27].

На рисунке 20 демонстрируется влияние различных параметров - отношения кислорода к топливу, времени инициации искры и процентного содержания водорода в топливной смеси - на пиковое давление сгорания в двигателе внутреннего сгорания. Каждая серия данных отражает определенное значение коэффициента избытка воздуха: серии, обозначенные сплошными точками, указывают на смеси с 20% обогащением водородом, в то время как серии с пустыми точками соответствуют чистому метану как топливу. Исходя из всех данных, становится ясно, что введение водорода в топливную смесь значительно снижает COV, особенно при работе двигателя на бедной смеси. Например, анализ данных показывает, что добавление 20% водорода уменьшает пиковое давление COV с 10,5 до 8 при коэффициенте избытка воздуха $\lambda=1,6$ и опережении зажигания 25° до верхней мертвой точки, что демонстрирует снижение более чем на 20% и подчеркивает, как водород влияет на бедные топливные смеси.

В области, приближающейся к стехиометрическим соотношениям,

также наблюдается эффект увеличения концентрации водорода; наблюдение за черными кривыми на рисунке 20. При этом указанный эффект влечет за собой снижение более чем на 20%. Таким образом, влияние водорода на снижение пикового давления COV обусловлено его способностью увеличивать максимальное давление, что в свою очередь снижает колебания давления.

Было замечено, что присутствие водорода повышает скоростные показатели распространения пламени и способствует его ускоренному формированию на начальных этапах. Ключевым элементом успешного горения является адекватное наличие топлива и кислорода вблизи точки искрообразования, так как несоблюдение оптимального баланса этих компонентов может привести к невозможности поддержания пламени. Водород играет решающую роль на стадии появления искры благодаря своим молекулярным характеристикам: молекулы H_2 обладают сравнительно слабыми межатомными связями, облегчающими их расщепление с образованием активных радикалов, что в свою очередь инициирует формирование первичного пламени. На дальнейших этапах, когда огненное ядро еще не обладает достаточной устойчивостью и может терять тепло, передавая его в систему зажигания, важно обеспечить условия для большего тепловыделения, чем потери, сопряженные с охлаждением. В этом аспекте водород вносит существенный вклад, ускоренно генерируя множество радикалов, которые эффективно участвуют в разложении молекул топлива и кислорода, обеспечивая быстрое и интенсивное выделение тепла.

Этот метод способствует удержанию слабого пламени, снижая при этом тепловые потери от искры свечи зажигания. Однако, когда пламя преодолевает границы свечи, оно начинает интенсивно увеличиваться в размерах. Водород ценится за его способность к быстрому выделению энергии после воспламенения, что значительно увеличивает порог обедненной смеси.

Водород может уменьшить выбросы от двигателей с воспламенением

от искры, функционирующих на основе природного газа.

Этот научный анализ был выполнен неоднократно и предоставил весомые доказательства через ряд экспериментов. К примеру, исследования [27, 28] сфокусировались на изучении эффекта интеграции водорода на эмиссии из природного газа. В теории, газообразный водород должен приводить к образованию воды как единственного продукта сгорания.

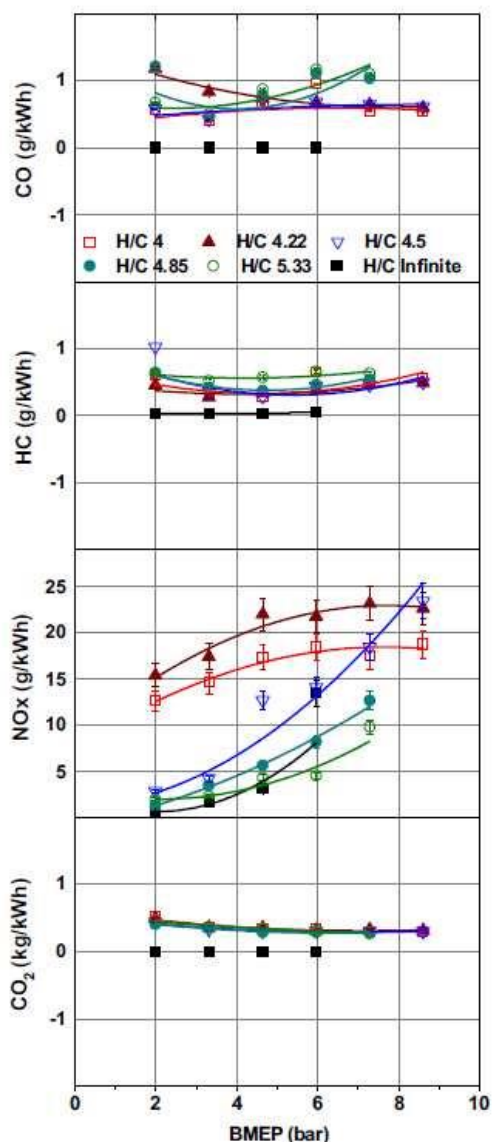


Рисунок 21 – Эффект водородного обогащения природного газа на уровень выбросов [27].

Эта информация однозначно указывает на то, что с увеличением нагрузки двигателя выше 5 бар (измеряемой в единицах BMEP), выбросы оксидов азота (NOx) значительно возрастают в сценариях использования

исключительно водорода по сравнению с другими изучаемыми условиями, где доля водорода в топливной смеси ниже. Этот феномен служит доказательством того, что повышенные температуры сгорания, связанные с более интенсивными нагрузками на двигатель, начинают оказывать заметное воздействие. Для контраста, представленное сравнение выявило определенную точку, когда при низких нагрузках на двигатель сценарии с исключительным использованием метана или низким содержанием водорода приводили к более высоким уровням NOx по сравнению с испытаниями на высокообогащенном водородом топливе. Такие выводы не получали подтверждения в других аналогичных работах. Отдельное исследование, обозначенное как [30] и иллюстрированное на рисунке 22, продемонстрировало, что выбросы NOx от двигателя систематически оставались на низком уровне при использовании природного газа без добавления водорода, что подтверждается представленной диаграммой сопоставления уровня NOx и значений лямбда (где лямбда обратно пропорциональна коэффициенту эквивалентности).

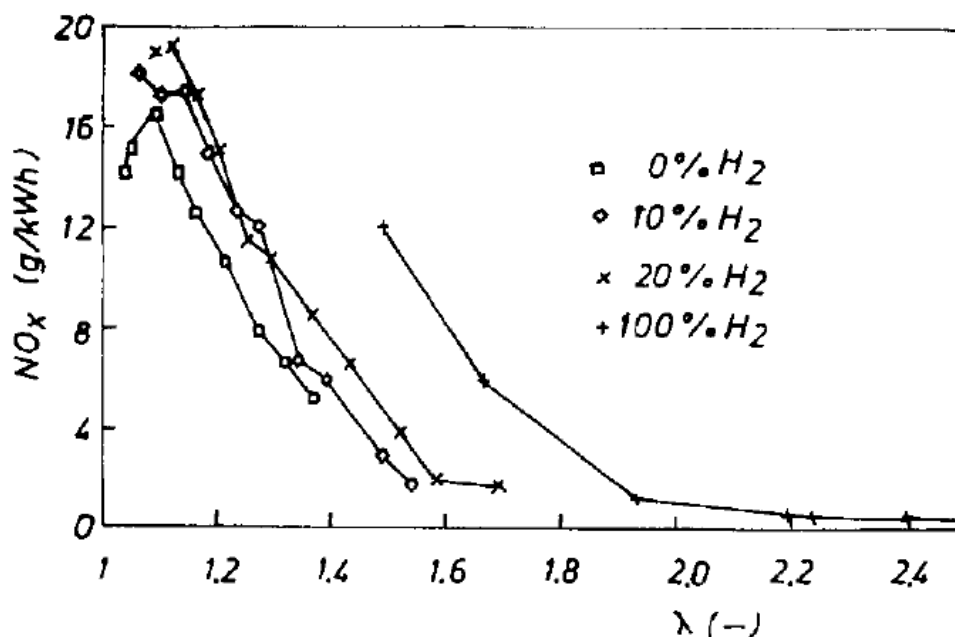


Рисунок 22 – В условиях использования бедного топлива, контекст с добавлением водорода в топливную систему демонстрирует снижение эмиссии NOx благодаря пониженной температуре внутри камер сгорания.

Этот результат привлекает внимание из-за того, что обе группы учёных выбрали метан в качестве основного компонента природного газа, учитывая, что метан составляет его основную часть. Характерно, что при снижении коэффициентов эквивалентности (то есть при обеднённой топливной смеси) уровень NO_x заметно падает по сравнению со стехиометрическими (идеальными) условиями.

Прежде всего, процесс термического разложения топлива и окислителя генерирует тепло, но из-за уменьшения количества топлива, участвующего в реакции, выделяется меньше энергии, сокращая тем самым общее количество тепловых реакций. Кроме того, распределение энергии в камере сгорания происходит более равномерно между всеми молекулами газа, что приводит к разделению доступной энергии на большее количество молекул воздуха, в результате чего температура повышается в меньшей степени. Это обуславливает, что сгорание обедненной топливной смеси производит заметно меньше тепла, чем сгорание смеси в идеальных стехиометрических пропорциях, что ведет к уменьшенному разрушению молекулярных связей азота (N_2) и таким образом, значительно снижает объемы выбросов оксидов азота (NO_x) в выпускном газе.

В то время как водород представляет значительные преимущества как дополнение к традиционным видам топлива, имея в виду повышение эффективности, существенные трудности также связаны с его применением. Дело касается гарантированной безопасности при хранении и перевозке и связанных с этим финансовых сложностей. Водород, обладая крайне мелкими размерами и высокой способностью к химическим реакциям, требует особых условий для избежания утечек, особенно учитывая, что он способен проникать через микроскопические поры, сквозь которые метан пройти не в состоянии. Это обстоятельство вносит дополнительные трудности в уже имеющуюся проблематику неплотностей инфраструктуры, используемой для природного газа, поскольку водородный компонент менее по размеру. Существенное количество исследовательских работ было

направлено на разработку надежных методик хранения водорода, однако найти экономически рациональное решение для ёмкостей, отличающихся высокой степенью герметичности, остается сложной задачей. Эта проблема особенно остро стоит в контексте опасности возгорания водорода. Таким образом, на текущем этапе водородная энергетика ещё не готова к полноценному внедрению в рыночную среду. Ожидается, что массовое распространение водорода как энергоносителя станет возможным после решения вопросов, связанных с хранением и транспортировкой на экономически выгодных условиях.

Водород, будучи добавлен к топливу, показывает хорошие результаты по эффективности, однако для его широкопрофильного применения требуется реализация более продвинутой инфраструктуры, чтобы обеспечить безопасность и выгоду его использования. Этот факт открывает двери для исследований альтернативных добавок к природному газу. На сегодня существует ограниченное количество научных публикаций, посвященных исследованию присадок к жидким топливам для моторов на природном газе. Исследование этих добавок является ключевым для повышения эффективности и снижения уровня выбросов, минуя масштабные преобразования существующей инфраструктуры.

Глава 3 Обзор результатов экспериментальных исследований процесса сгорания природного газа с добавкой водорода в УИТ-85 при подаче топлива во впускной трубопровод

3.1 Воздействие угла опережения зажигания на особенности горения метана

Термодинамические параметры процесса сгорания комплексно отражают все его ключевые аспекты.

Важные характеристики двигателя модели УИТ-85 (рисунок 23) включают в себя наличие одного цилиндра, обладающего рабочим объемом 0,652 л, и степенью сжатия равной 7. Диаметр цилиндра составляет 85 мм, в то время как ход поршня достигает 115 мм, а длина шатуна равна 266 мм. Данный двигатель может функционировать на скоростях 600 или 900 оборотов в минуту. Система воспламенения работает за счет свечи зажигания, а подача топлива осуществляется в впускной коллектор. Регулирование подачи воздуха производится через изменение положения дроссельной заслонки карбюратора.



Рисунок 23 – Установка УИТ-85 для проведения экспериментальных работ

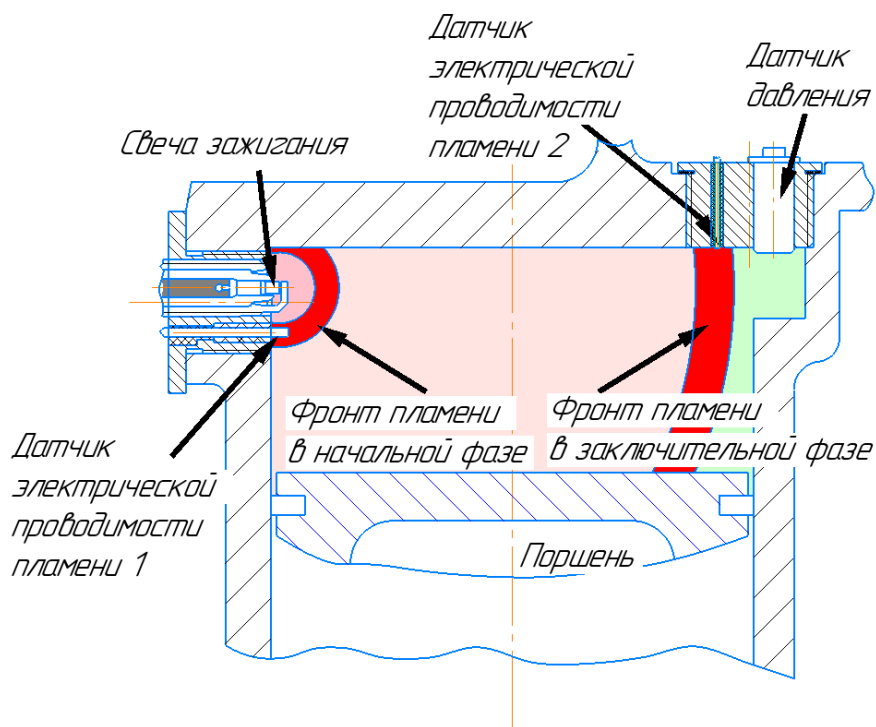


Рисунок 24 – Схема камеры сгорания с установленными датчиками

Экспериментальный аппарат был оснащен сложной системой для параллельного сбора данных по множеству параметров, включая информацию от сенсоров, предназначенных для изучения электропроводности огня. Рисунок 25 демонстрирует результаты измерений проводимости, собранные через установленный в дальней зоне горелки датчик.

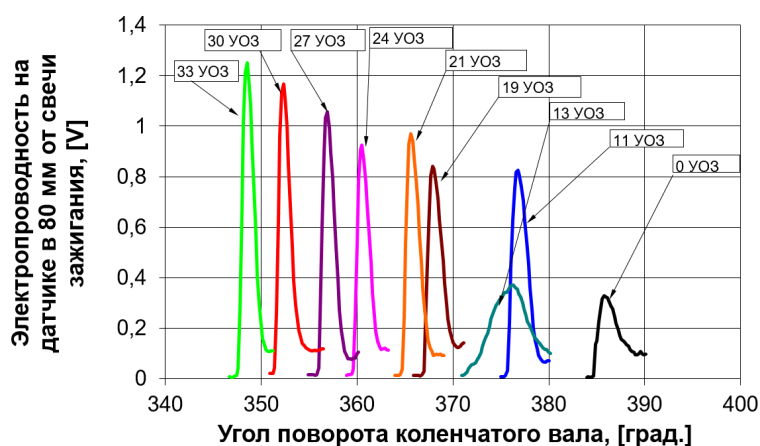


Рисунок 25 – Влияние угла опережения зажигания на электропроводность пламени в конце процесса сгорания при работе на природном газе

На рисунке 26 демонстрируются показатели электропроводности, зафиксированные сенсором, установленным рядом со свечой искрообразования.

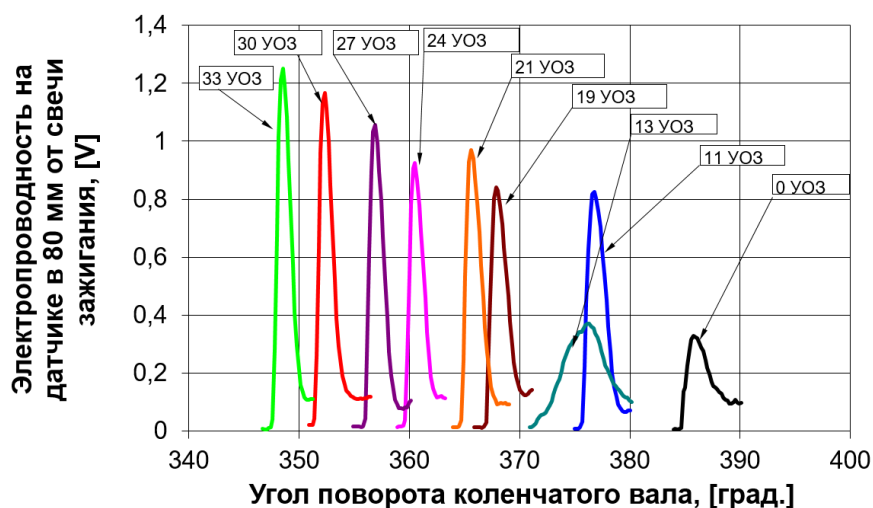
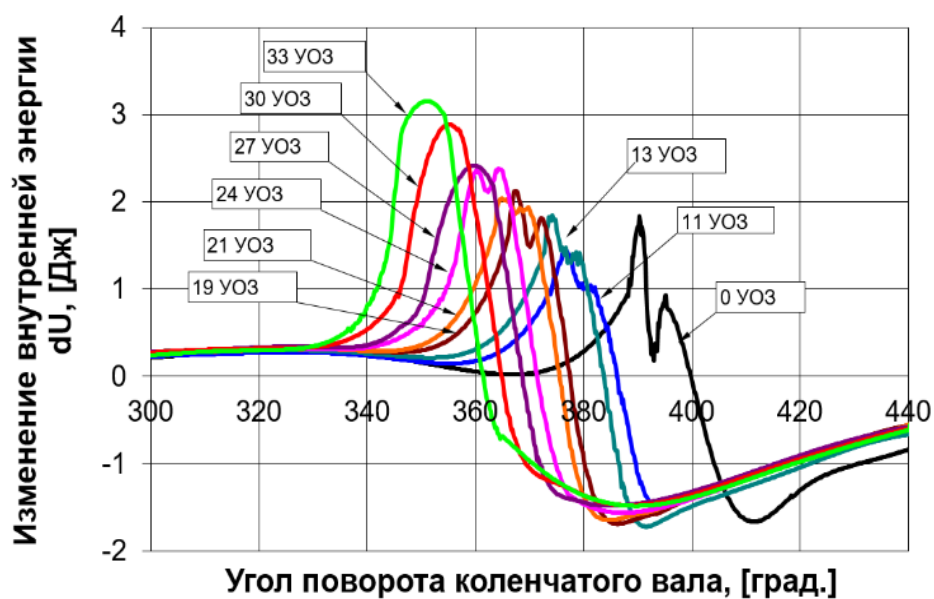
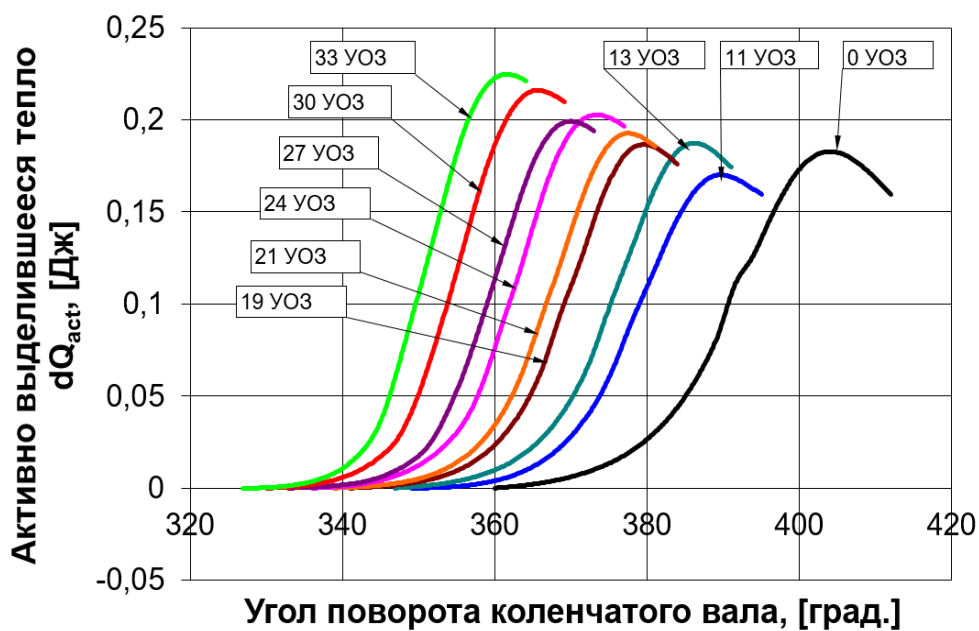


Рисунок 26 – Влияние угла опережения зажигания на электропроводность пламени в начале процесса сгорания при работе на природном газе

Рисунок 27 иллюстрирует эффект угла опережения зажигания на термодинамические характеристики горения, демонстрируя вариации внутренней энергии в процессе горения (см. рисунок 27а) и характеристики выделения энергии за один рабочий цикл (см. рисунок 27б).



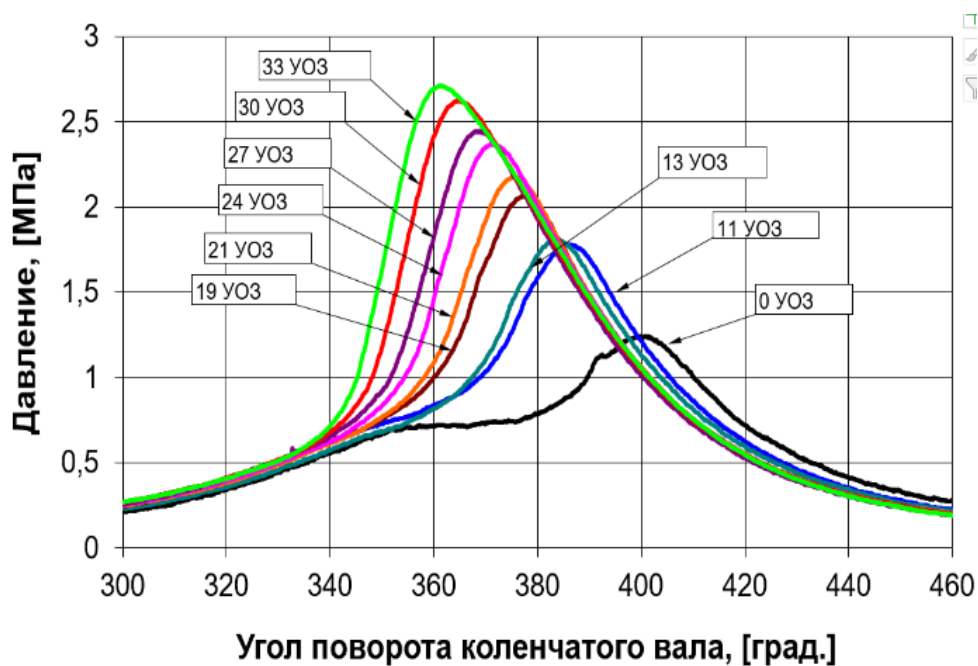
а)



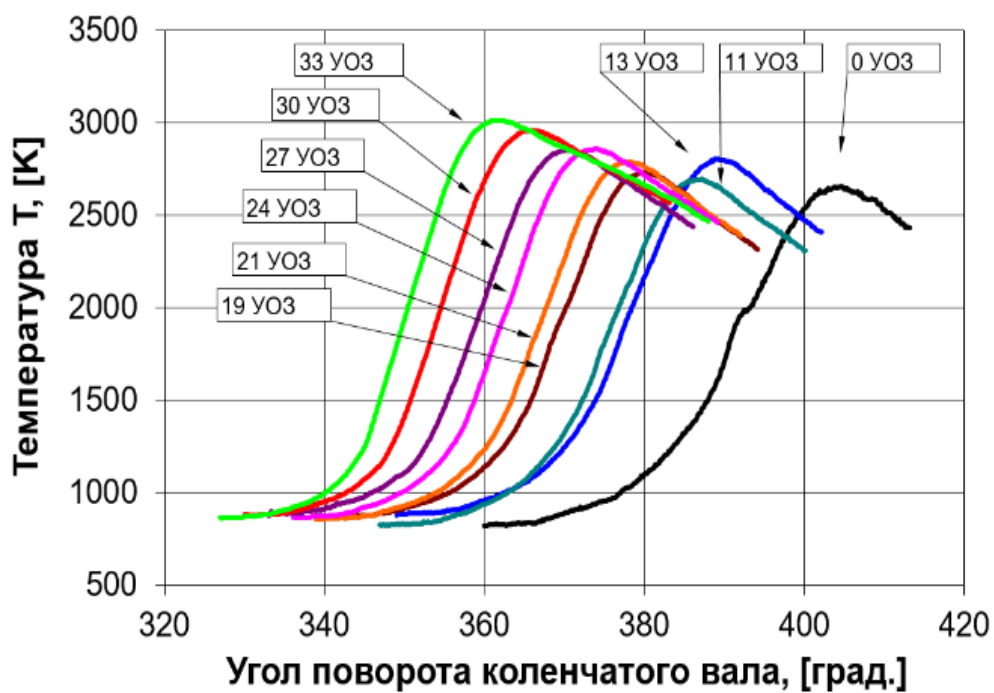
б)

Рисунок 27 – Влияние угла опережения зажигания на термодинамические параметры процесса сгорания в УИТ-85: а – изменение внутренней энергии в процессе сгорания; б – параметры тепловыделения за один цикл.

На рисунке 28 показано, как угол опережения зажигания влияет на ключевые показатели процесса горения, включая динамику изменения давления в цилиндре (рисунок 28а) и температурные параметры в ходе горения (рисунок 28б).



а)



б)

Рисунок 28 – Влияние угла опережения зажигания на индикаторные параметры процесса сгорания в УИТ-85: а – изменение давления в цилиндре двигателя; б – температура в процессе сгорания.

Исследование эффекта изменения угла опережения зажигания на характеристики рабочего цикла демонстрируется на рисунке 29.

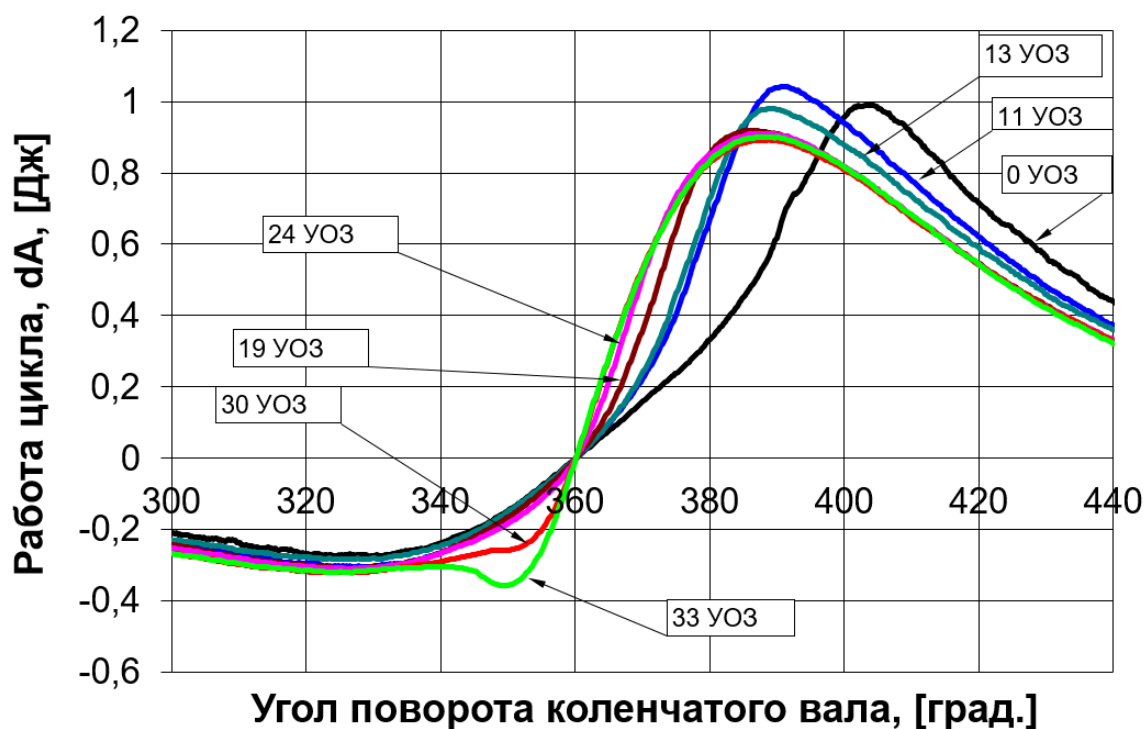


Рисунок 29 – Влияние угла опережения зажигания на изменение работы цикла

Исследование данных характеристик выявило, что наилучшая эффективность цикла достигается при установке угла опережения зажигания на 11 градусов до верхней мертвой точки (ВМТ). Это значительно повышает эффективность, поскольку основная часть тепловой энергии высвобождается непосредственно перед ВМТ, обеспечивая тем самым оптимальное расширение. В рассматриваемом режиме также достигаются относительно низкие температурные показатели, благодаря чему снижается концентрация оксидов азота в выхлопных газах. Анализ электропроводности демонстрирует, что активность окислительных реакций в зоне горения является высокой как в начальной, так и в последующих фазах сгорания.

3.2 Воздействие компонентов газовой смеси на свойства горения природного газа

Среди переменных элементов конфигурации газового топлива выделяется корректировка значения коэффициента избыточного воздуха в диапазоне от 0,8 до критической отметки, при которой происходит бедный разрыв пламени, и модификация содержания водорода в энергоносителе путем его интеграции в объеме от 0 до 15 процентов от общего веса топлива, используемого в энергетических установках типа УИТ-85.

На иллюстрации 30 изображены зависимости электропроводимости в зоне воспламенения у электрода свечи зажигания (параметр тока 1) и на расстоянии 80 мм от неё в финальной фазе горения (параметр тока 2) при изменении коэффициента избыточного воздуха.

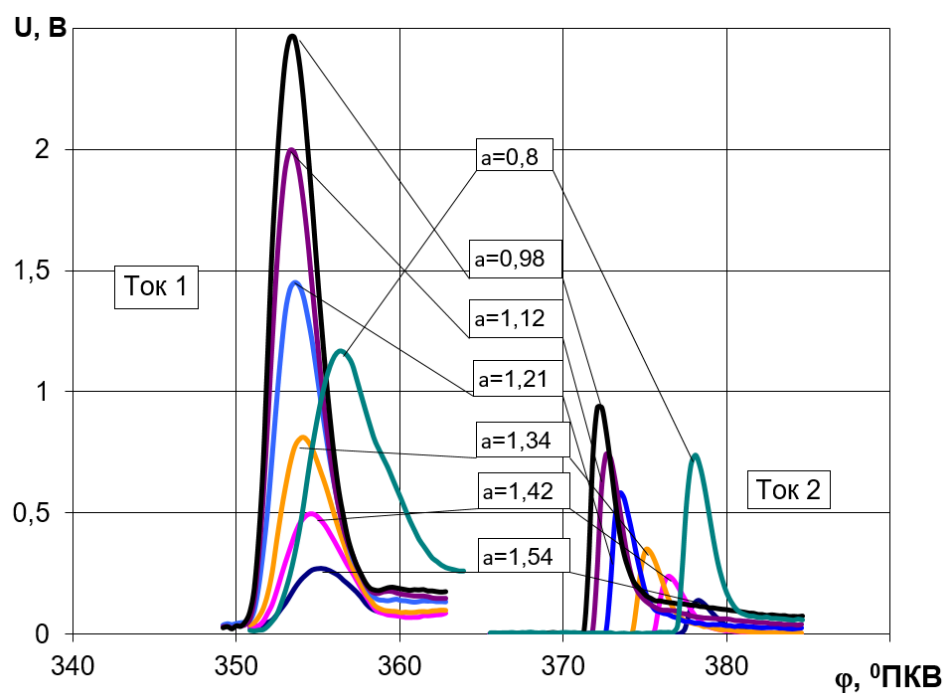


Рисунок 30 – Характеристики электропроводности в пламени у свечи зажигания (ток 1) и в 80 мм от свечи зажигания в завершающей части сгорания (ток 2) при добавке 15% водорода

На рисунке 31 демонстрируются параметры электрической проводимости в зоне горения около свечи зажигания (ток I) и на расстоянии 80 миллиметров от нее в конечной фазе процесса горения (ток II), при вариациях коэффициента избыточного воздуха, используя в качестве топлива смесь сжиженного природного газа с 10-процентным добавлением водорода.

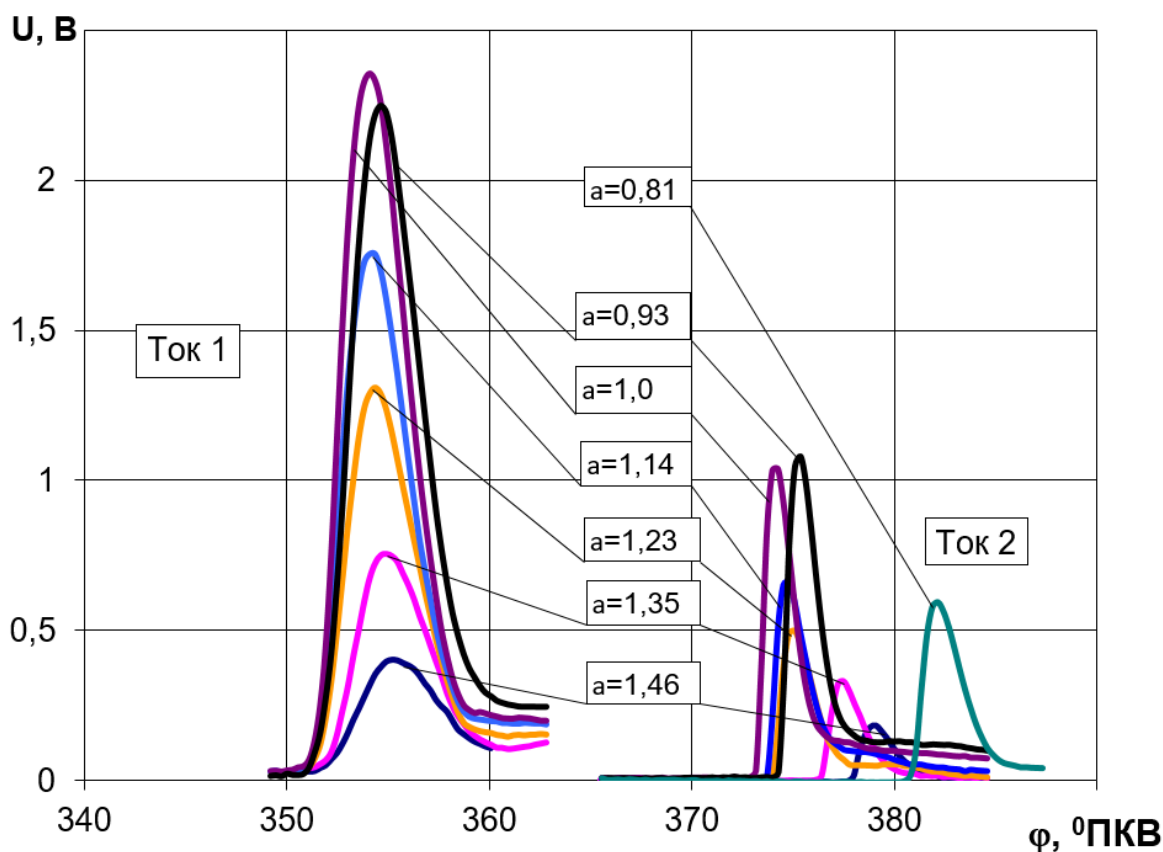


Рисунок 31 – Характеристики электропроводности в пламени у свечи зажигания (ток 1) и в 80 мм от свечи зажигания в завершающей части сгорания (ток 2) при добавке 10% водорода

На рисунке 32 и 33 представлены данные об изменении электропроводности в зоне горения двух разных местах: непосредственно у электрода свечи зажигания (измерение тока 1) и на расстоянии 80 мм от свечи в финальной фазе горения (измерение тока 2). Изменения зафиксированы при вариации коэффициента избытка воздуха для двух видов топлива: сжатый природный газ, обогащённый 5% водорода, и сжатый природный газ (КПГ), используемый без добавления водорода.

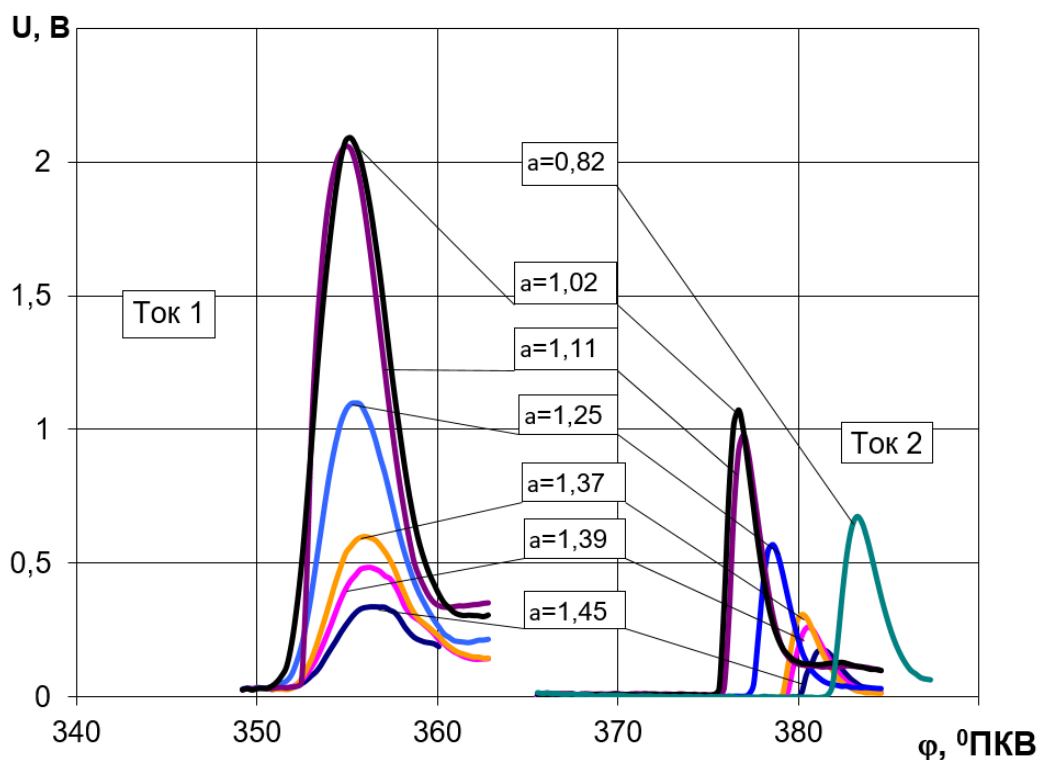


Рисунок 32 – Характеристики электропроводности в пламени у свечи зажигания (ток 1) и в 80 мм от свечи зажигания в завершающей части сгорания (ток 2) при добавке 5% водорода

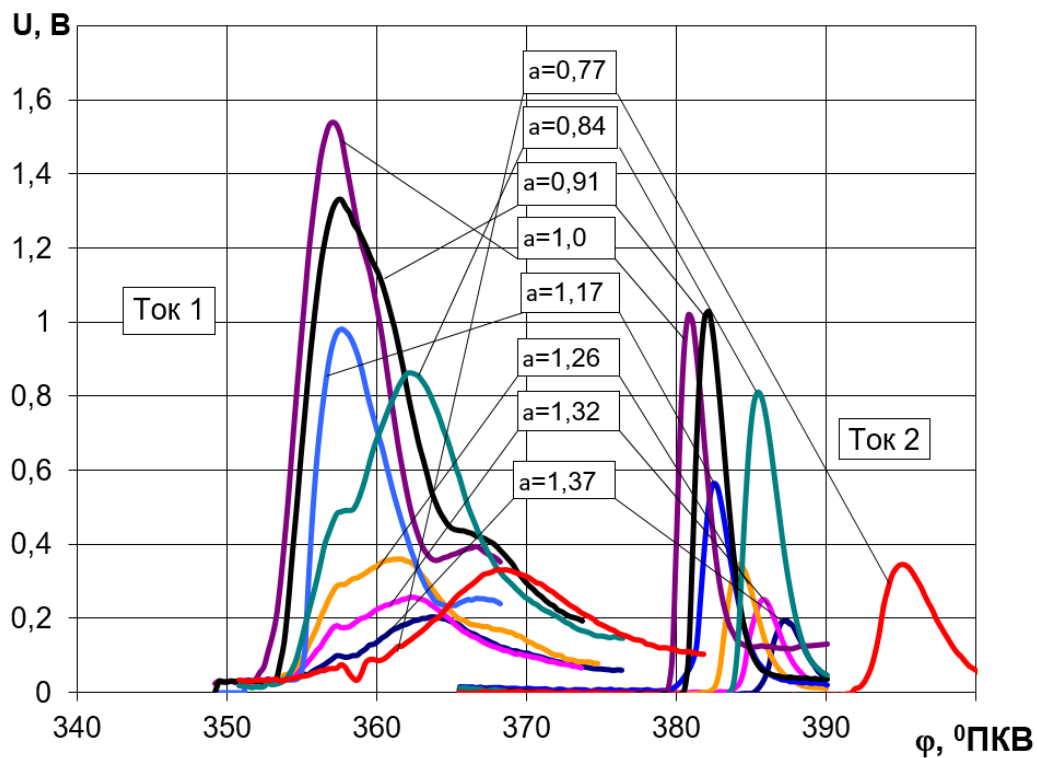


Рисунок 33 – Характеристики электропроводности в пламени у свечи зажигания (ток 1) и в 80 мм от свечи зажигания в завершающей части сгорания (ток 2) при работе на СПГ без добавки водорода

Для анализа эффекта водорода на производительность и качество теплогенерации, изучим, как избыточный коэффициент воздуха влияет на динамику теплоотдачи (см. рисунок 34) и параметры теплогенерации (см. рисунок 35), при обогащении сжиженного природного газа 15% содержанием водорода.

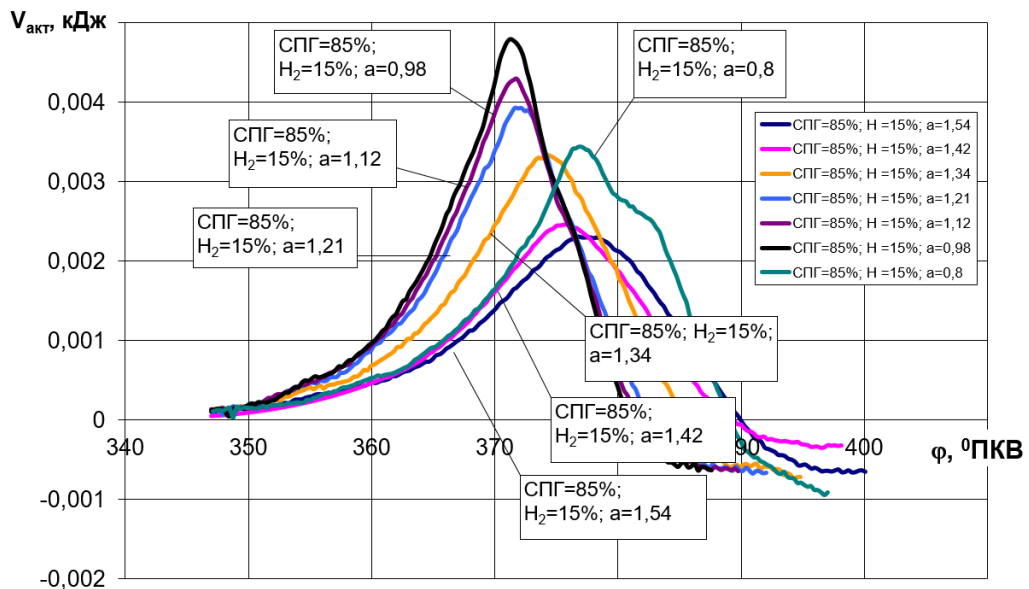


Рисунок 34 – Доля активного тепловыделения при добавке 15% водорода

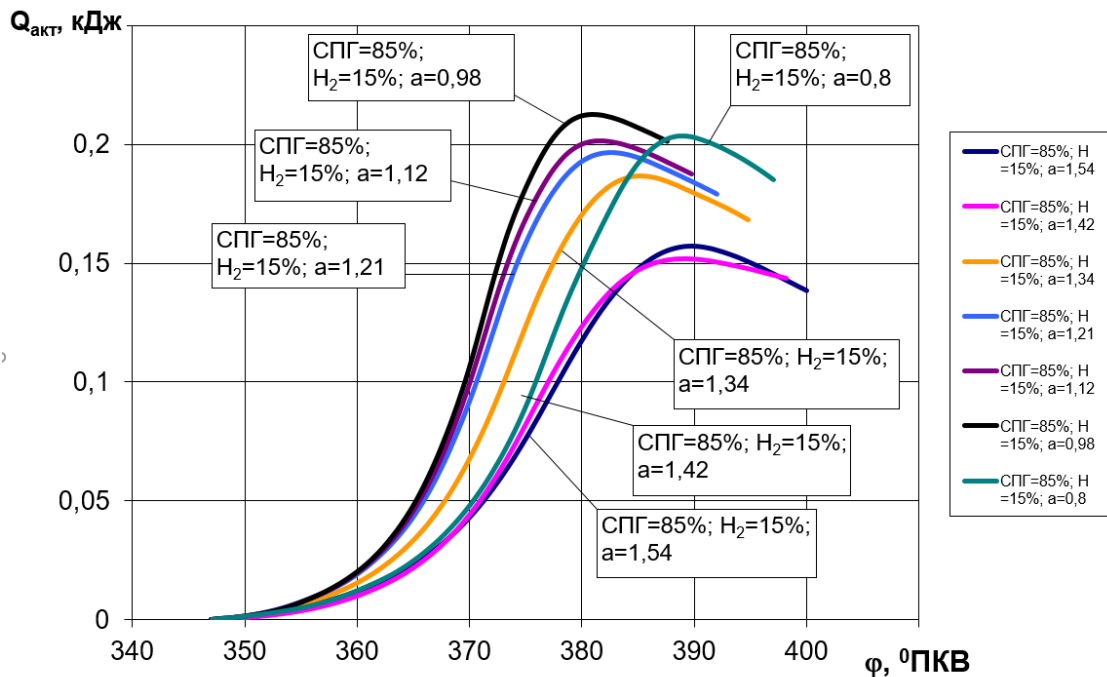


Рисунок 35 – Характеристика тепловыделения при добавке 15% водорода в сжатый природный газ

На рисунках 36 и 37 показано, как изменяется количество выделяемого тепла при вмешивании 10 и 5 процентов водорода соответственно в сжиженный природный газ.

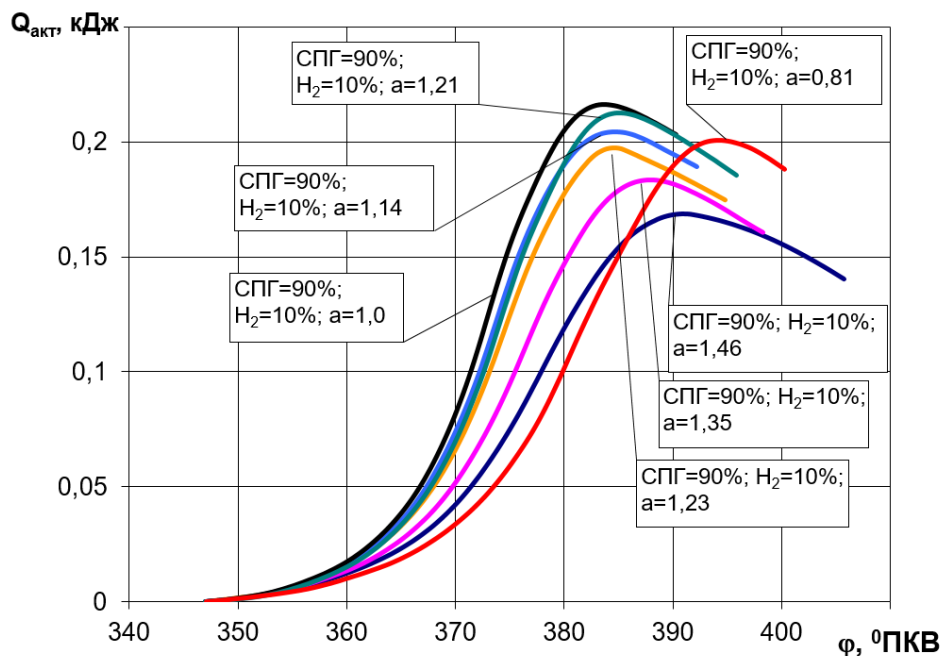


Рисунок 36 – Характеристика тепловыделения при добавке 10% водорода в сжатый природный газ

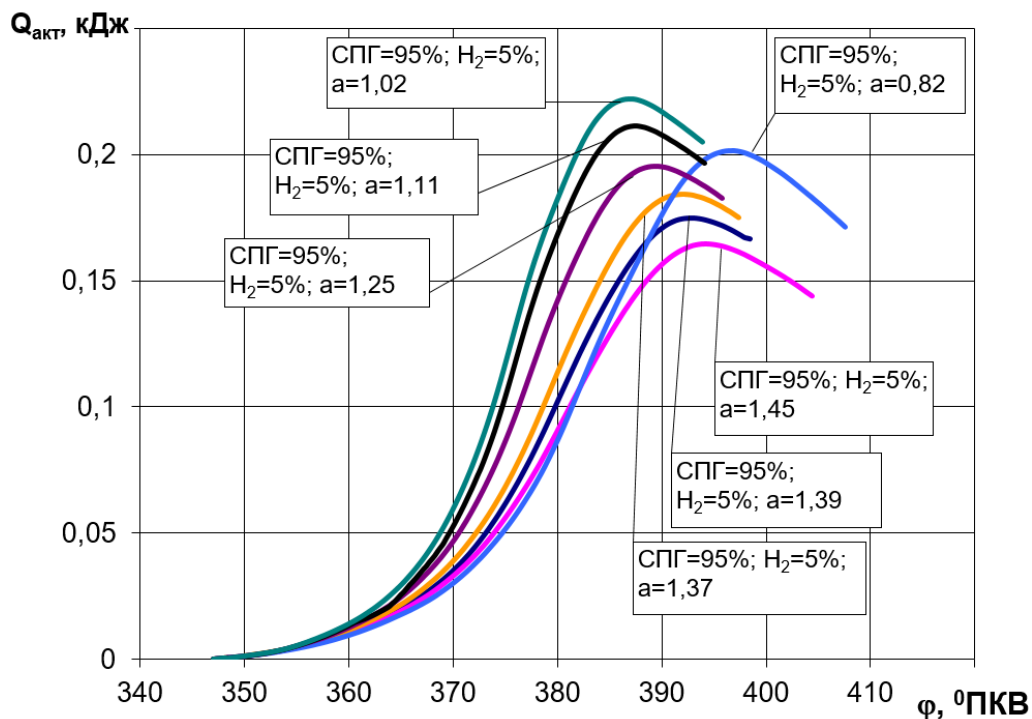


Рисунок 37 – Характеристика тепловыделения при добавке 5% водорода в сжатый природный газ

На рисунке 38 описано распределение выделения тепла в процессе функционирования на сжиженном природном газе.

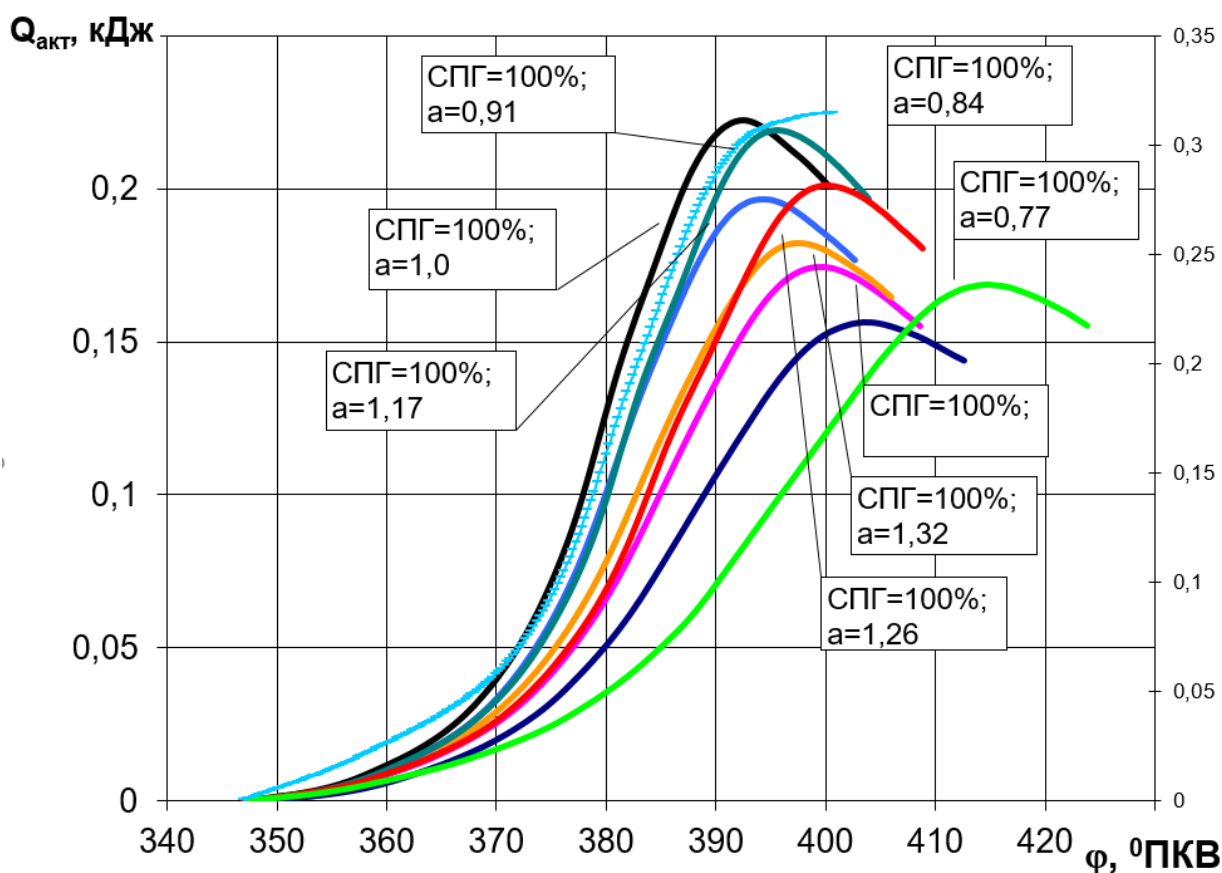


Рисунок 38 – Характеристика тепловыделения при работе на сжатом природном газе

Наблюдается, что внесение водорода укрепляет стабильность и поднимает эффективность горения. Использование исключительно природного газа сталкивается с проблемами при сложных горючих условиях, например, при высокой разбавленности отработанными газами или при сниженной концентрации горючего воздушной смеси, что приводит к нестабильности горения. Это вынуждает применять катализаторы горения, как, например, водород. Добавление водорода в объеме 5% от общего веса топлива оказывает заметное положительное влияние на постоянство зажигания и процесса сгорания.

Глава 4 Результаты анализа экспериментов на сжигание метана с добавкой водорода на стенде УИТ-85 с инжекцией во впускной коллектор

Модели портативных газоаналитических инструментов «МЕТА» Автотест-01.03П и Автотест-02.03П включали в свои функции измерение уровней вредных компонентов, таких как оксиды азота (NOx), метан (CH) и угарный газ (CO), присутствующих в составе выхлопных газов транспортного средства. Погрешность измерения, зарегистрированная в технических характеристиках прибора, устанавливалась на уровне 5%.

Для визуализации степени токсичности используются не относительные показатели, такие как проценты или части на миллион (ppm), а абсолютные значения. К примеру, измеряется количество токсичных веществ, выделяемых за один полный цикл работы четырехтактного двигателя. В связи с этим, в рисунках 39, 40 и 41 представлены данные о содержании токсичных элементов, выраженные в миллиграммах на цикл, при функционировании двигателя на сжиженном нефтяном газе (КПГ) и смеси КПГ с водородом.

На рисунках 39, 40 и 41 демонстрируются параметры для глубокого осмысления того, как термодинамические параметры процесса сгорания воздействуют на уровень токсичных выбросов в бензиновых двигателях [4,5].

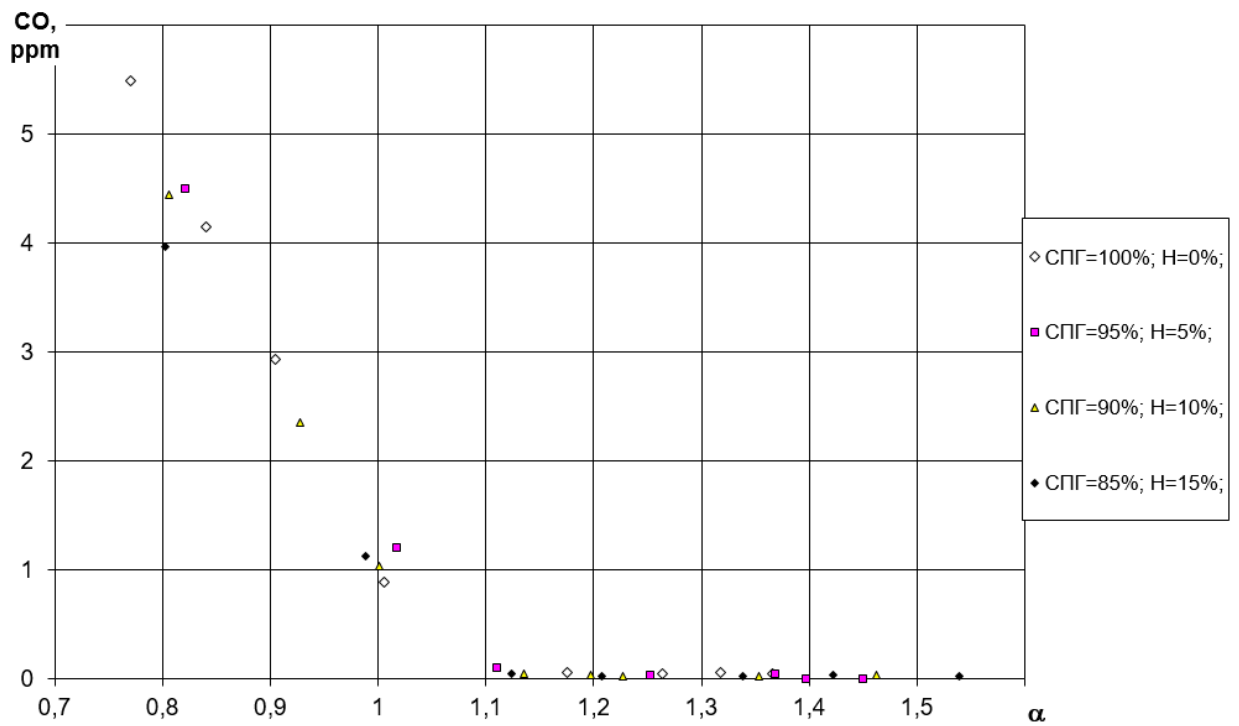


Рисунок 39 – Концентрация токсичных компонентов оксида углерода (CO) в выхлопных газах УИТ-85 при работе на КПГ и КПГ с водородом

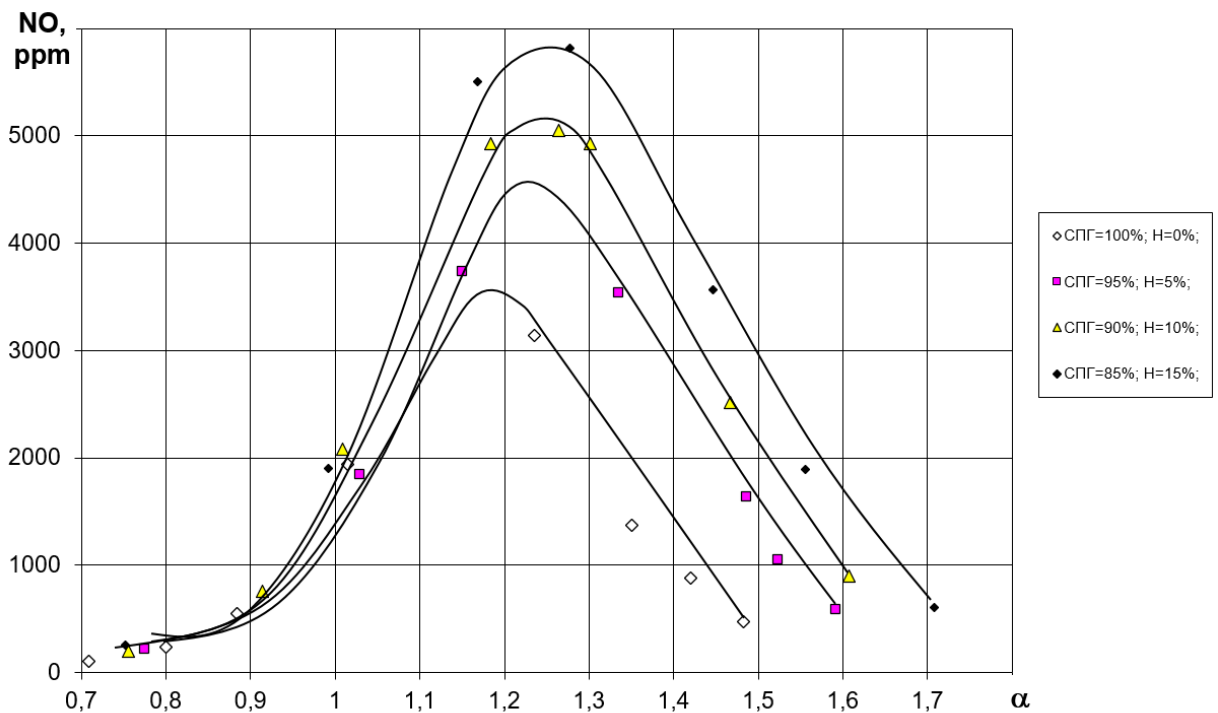


Рисунок 40 – Концентрация токсичных компонентов оксидов азота (NOx) в выхлопных газах УИТ-85 при работе на КПГ и КПГ с водородом

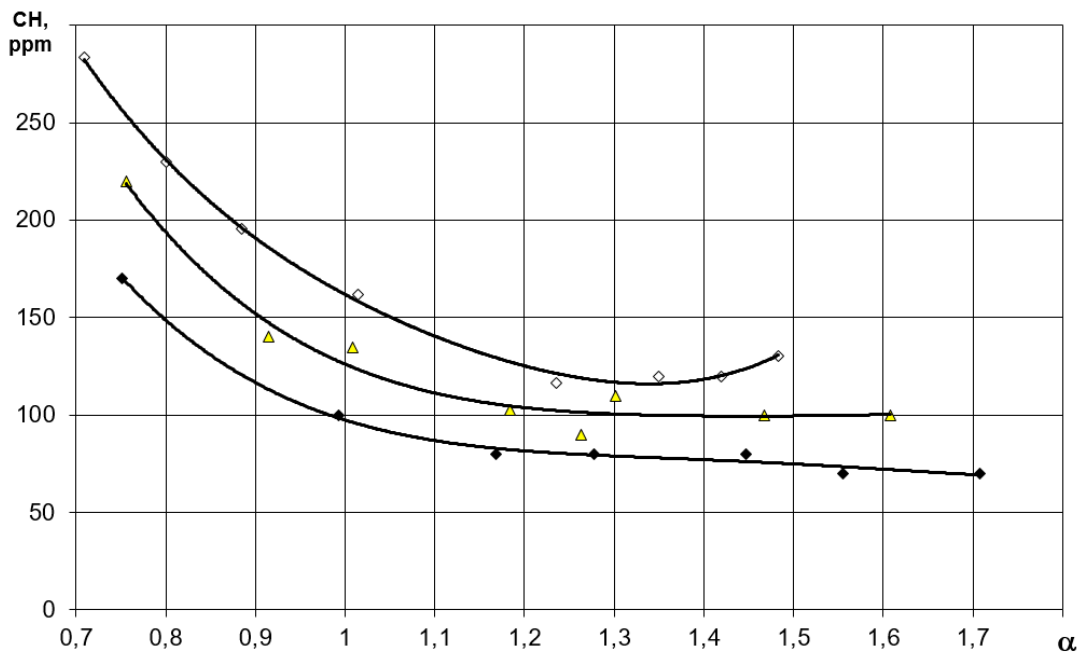


Рисунок 41 – Концентрация токсичных компонентов несгоревших углеводородов в выхлопных газах УИТ-85 при работе на КПГ и КПГ с водородом

На рисунке 42 приведена связь температуры конца сгорания с максимальной температурой цикла в УИТ-85 при работе на КПГ и КПГ с водородом.

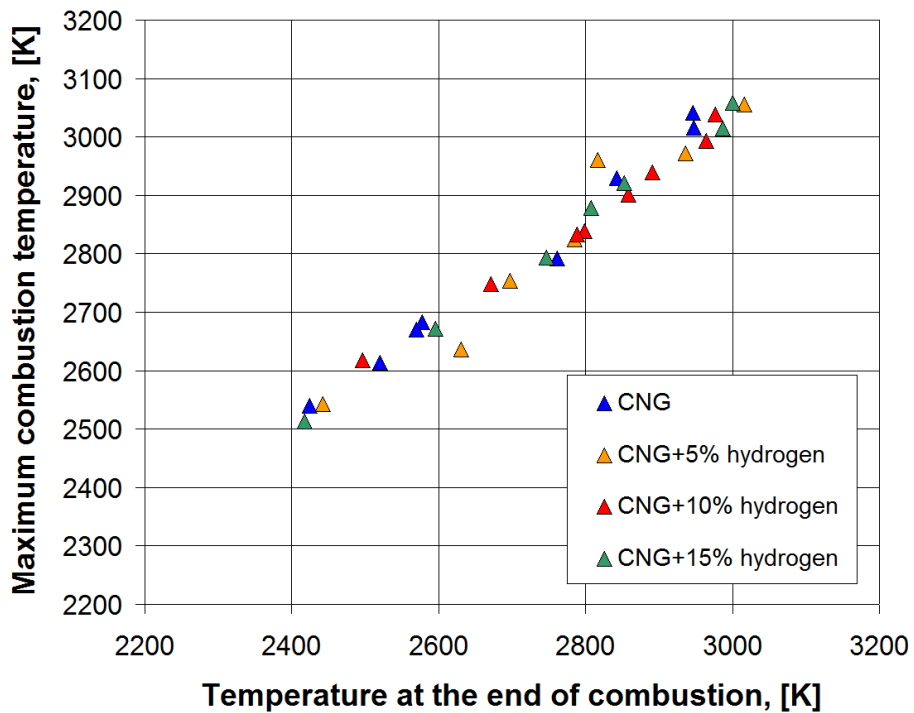


Рисунок 42 – Связь температуры конца сгорания с максимальной температурой цикла в УИТ-85 при работе на КПГ и КПГ с водородом

На рисунках 43, 44, и 45 приведена связь угарного газа (CO), оксидов азота (NOx) и несгоревших углеводородов (CH) с температурными характеристиками процесса сгорания.

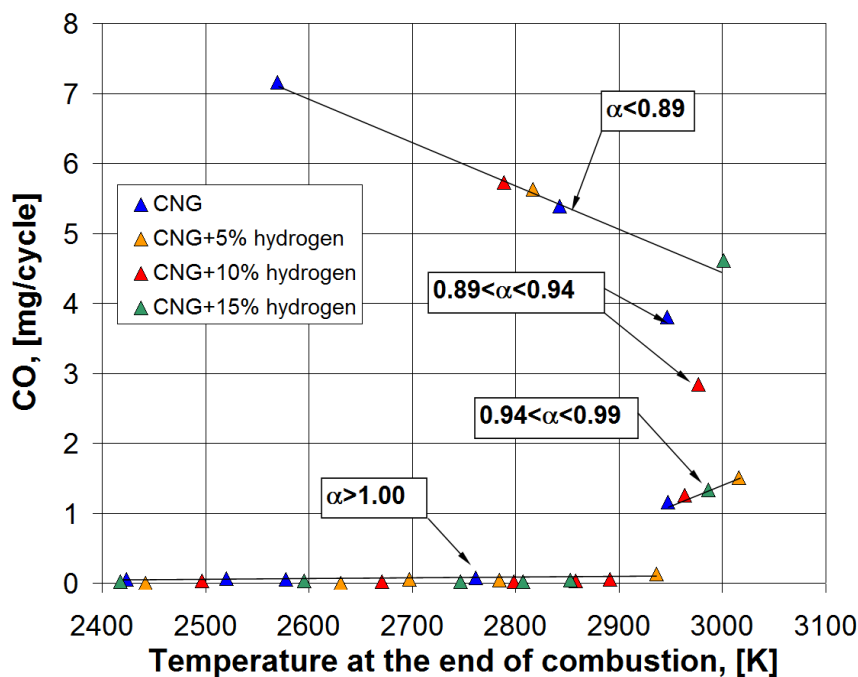


Рисунок 43 – Связь угарного газа (CO) с температурой окончания сгорания

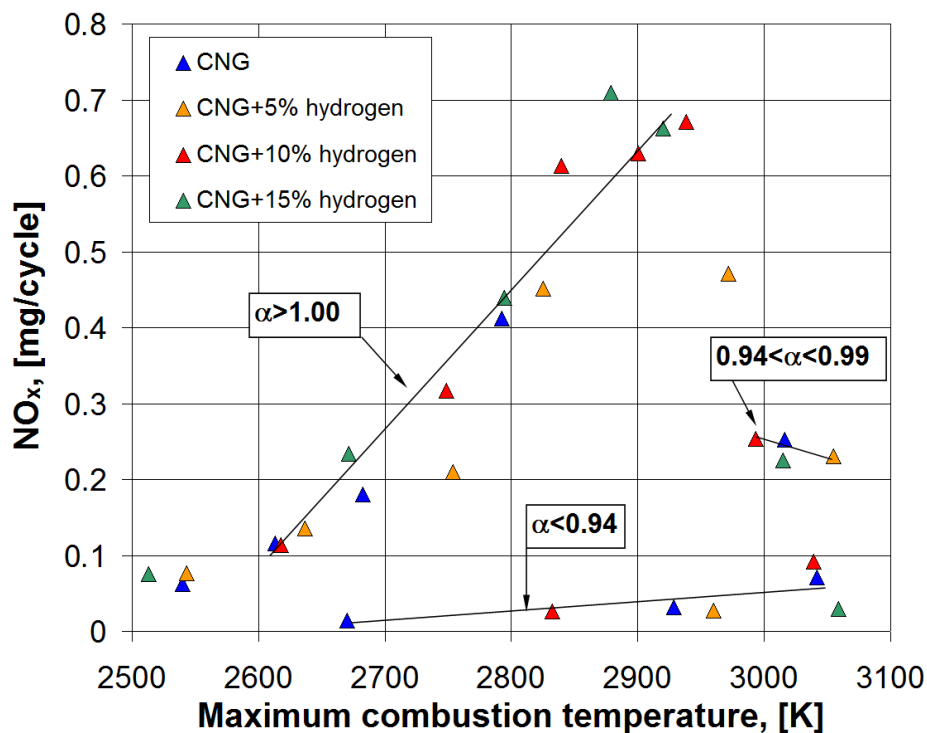


Рисунок 44 – Связь оксидов азота (NOx) с максимальным температурным циклом

Анализируем взаимосвязь между температурными условиями и процессом формирования неполностью сгоревших углеводородов в камере сгорания двигателя, как это отображено на рисунке 45. Изображение подтверждает, что концентрация НСГ не демонстрирует прямую зависимость от температурных изменений в ходе горения. Вместо этого, уровень их присутствия определяется наличием достаточного объема кислорода для эффективного сгорания и возможностью уменьшения объема горючих углеводородов путем их замещения на водород, который полностью сгорает, активно потребляя кислород. Таким образом, при значительной нехватке кислорода, внедрение водорода не приводит к уменьшению токсичности за счет снижения содержания парниковых газов. Осматривая механизмы, способствующие формированию НСГ в камере сгорания, основное внимание уделяется процессам, вызванным нехваткой кислорода или замедлением скорости сгорания. Дополнительный механизм формирования НСГ связан с процессами у стенок, где быстрое понижение температур под воздействием теплоотвода способствует обрыву горючих цепей.

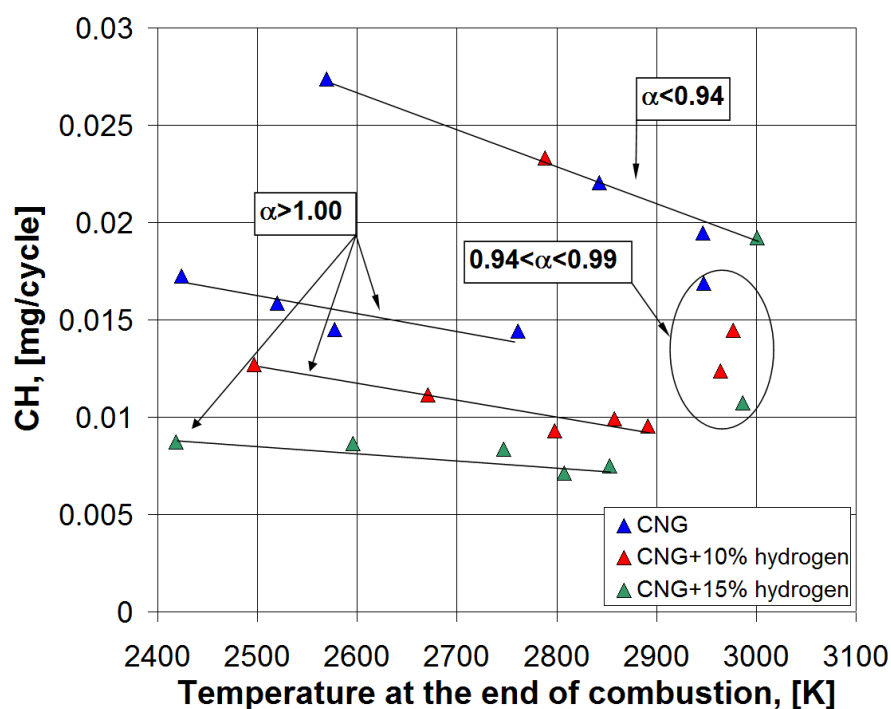


Рисунок 45 – Связь несгоревших углеводородов (CH) с температурой окончания сгорания; (б) площадь стенки в конце горения.

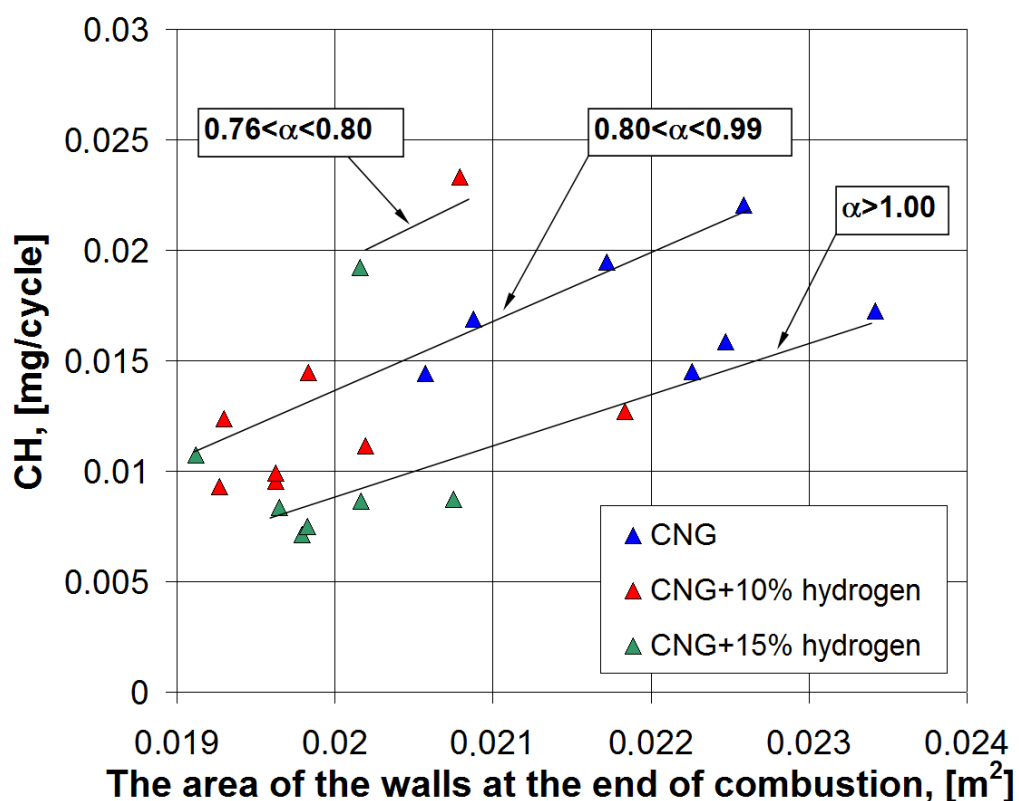


Рисунок 46 – Связь несгоревших углеводородов (CH) с площадью стенки камеры сгорания в конце горения.

Учитывая, что при использовании топливных смесей с избытком кислорода происходит полное окисление в области пламени, основную роль в формировании углерода (CH) играет образование пристеночного слоя, чья площадь напрямую воздействует на степень токсичности выделений CH. В ситуации с кислородным дефицитом также отмечается прямая корреляция между размерами пристеночного налета и уровнем токсичности CH к окончанию сгорания. Выявленные прямые зависимости свидетельствуют о том, что CH, возникающий внутри смеси вследствие ограничения кислорода, объединяется с CH, сохраняющимся в зоне у стенок. Влияние характеристик исходного топлива ограничивается лишь воздействием на скорость горения, увеличивающуюся при обогащении смеси водородом, что, в свою очередь, способствует сокращению объема пристеночной зоны.

Внесение водорода в состав комбинированного горючего газа (КГГ) скрывает различия в исследуемых образцах, указывая на его полное сгорание и перераспределение дефицита кислорода на КГГ. В связи с этим, влияние

типа топлива на уровень токсичности при недостатке кислорода на рисунке 47 не отмечается.

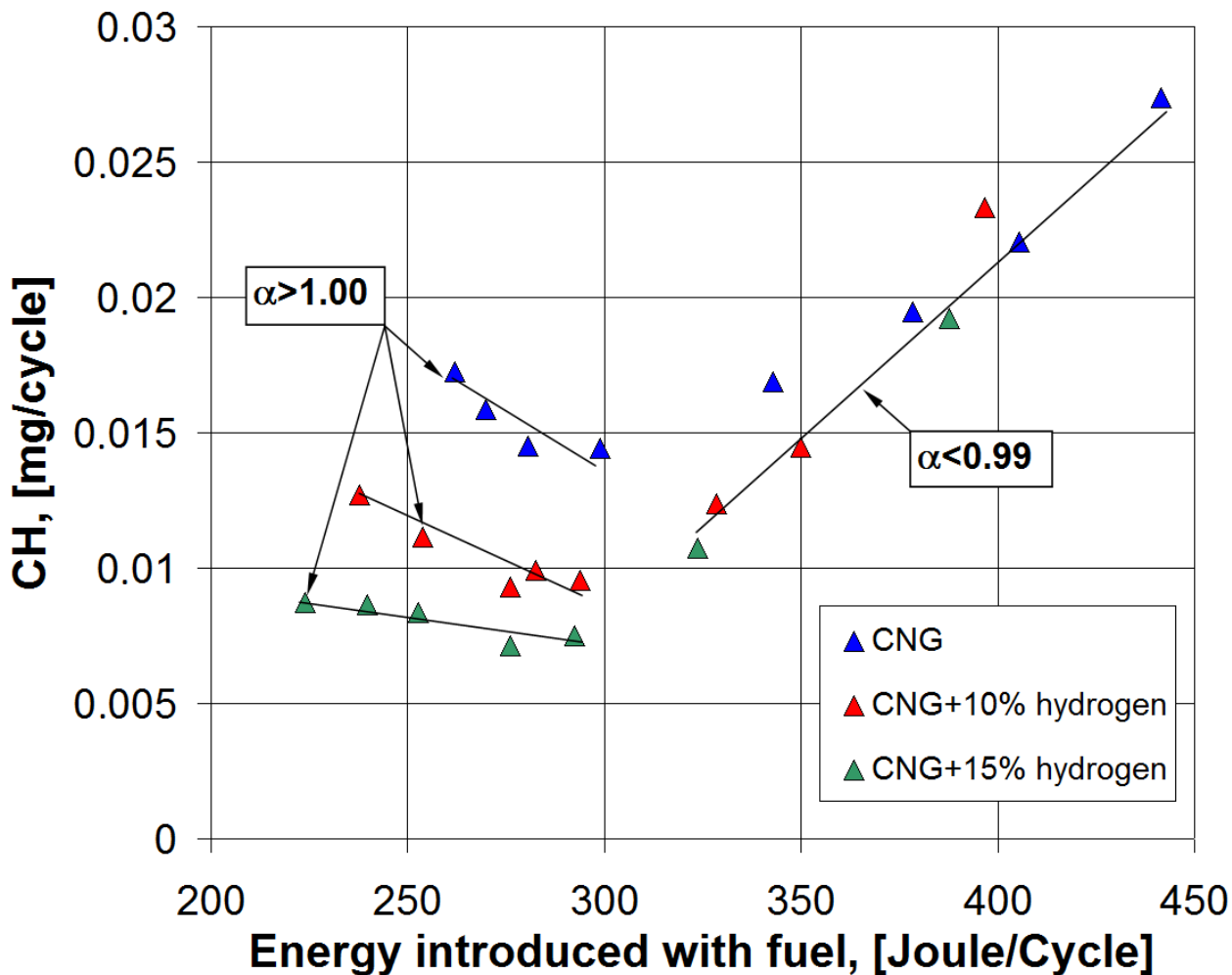


Рисунок 47 – Связь токсичности СН с характеристиками процесса сгорания — связь с энергией, вносимой в цилиндр с топливом

Связь между загрязненностью и амплитудой ионного тока представлена на схемах 48, 49, и 50. Анализируя рисунок 48, показывающий уровень загрязнения СН, замечена очевидная взаимосвязь между СН и амплитудой сигнала для топливных смесей с достаточным кислородом.

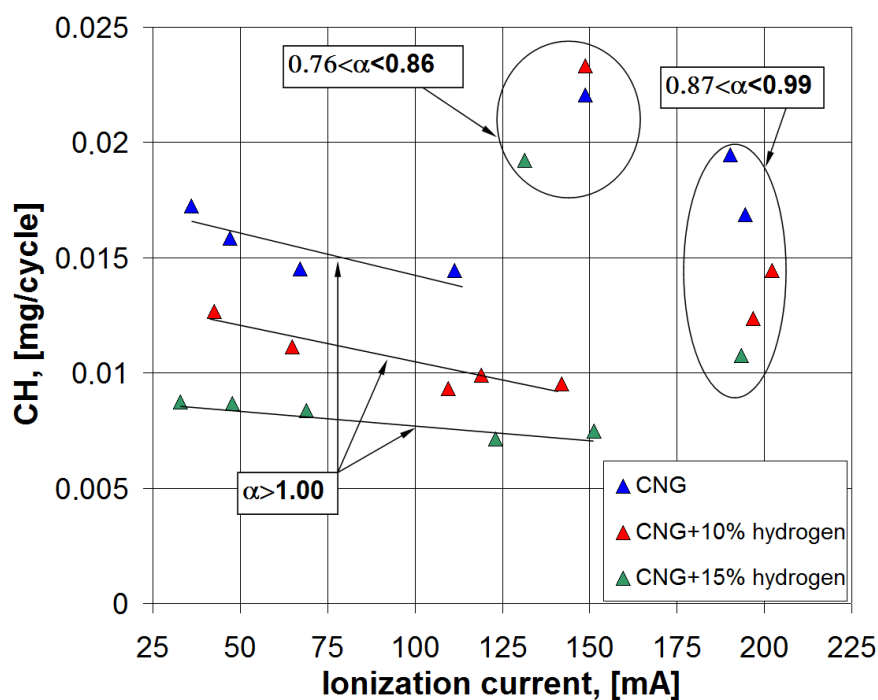


Рисунок 48 – Связь с электропроводностью пламени в конце основной фазы процесса горения.

Анализ, приведенный на рисунке 49 показывает, что связь между концентрацией вредных оксидов азота (NO_x) и амплитудой сигнала ионизации сильнее, чем со степенью токсичности углеводородов (CH). В областях, где преобладает доступ кислорода, видна высокая степень корреляции, обусловленная термическими процессами формирования NO_x. Подобным образом тесно связаны и показатели токсичности NO_x в условиях, когда кислорода недостаточно и первостепенен механизм образования NO_x за счет процессов в области горения. При значениях коэффициентов избытка воздуха между 0,94 и 0,99 наблюдается пик электропроводности пламени, который мало подвержен изменениям даже при введении водорода в смесь, что создает сложности для точного определения уровня токсичности в этом интервале для всех типов исследованных токсичных веществ.

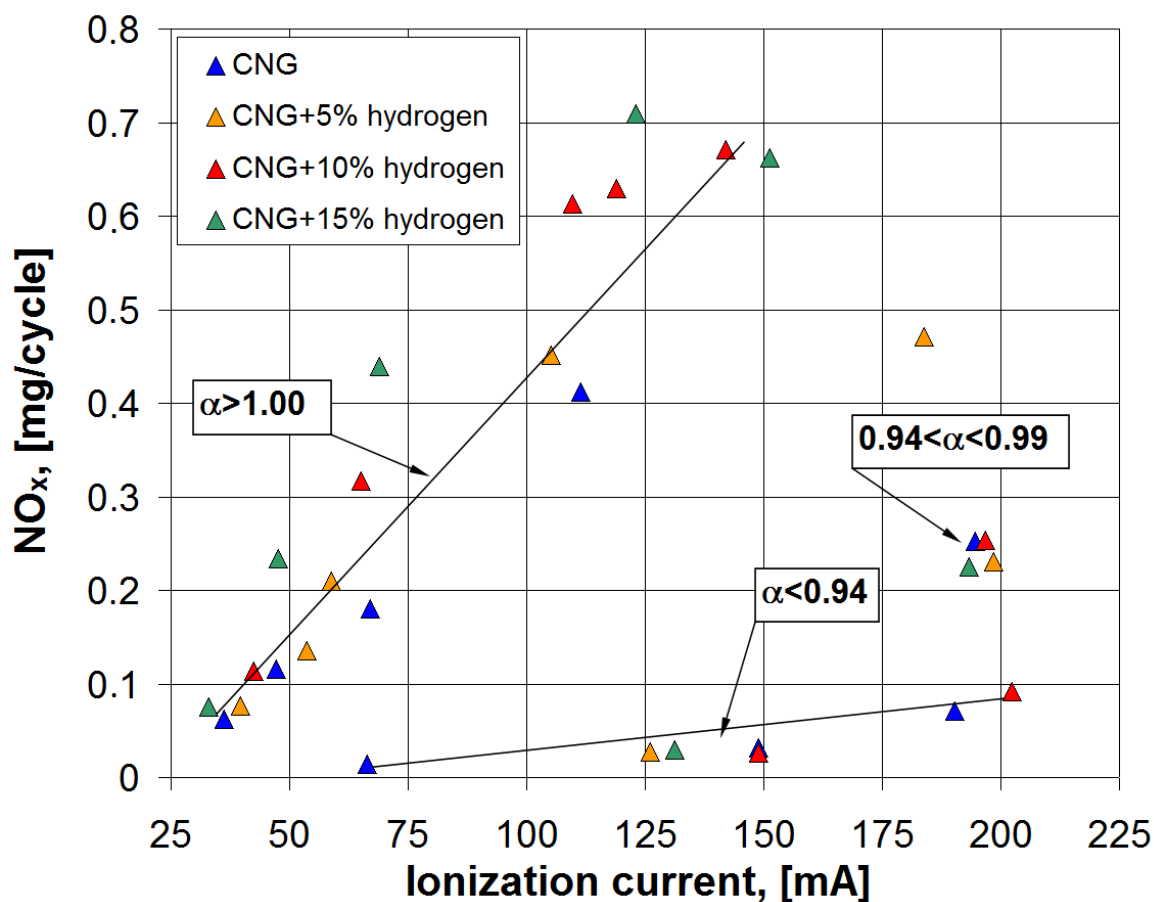


Рисунок 49 – Связь токсичности по оксидам азота (NO_x) с характеристиками электропроводности пламени в конце основной фазы процесса горения

На рисунке 50, видно, что корреляция между этими параметрами наблюдается только при коэффициентах избытка воздуха, не превышающих 0.94. В интервале значений коэффициента от 0.94 до 0.99, означающего слегка повышенное содержание воздуха, установить однозначную зависимость не удастся из-за уже выявленных сложностей. При коэффициенте избытка воздуха больше единицы, концентрация угарного газа снижается до минимума и ее колебания определяются исключительно точностью измерительных приборов. Следовательно, использование проводимости пламени для анализа токсичности CO оказывается неэффективным.

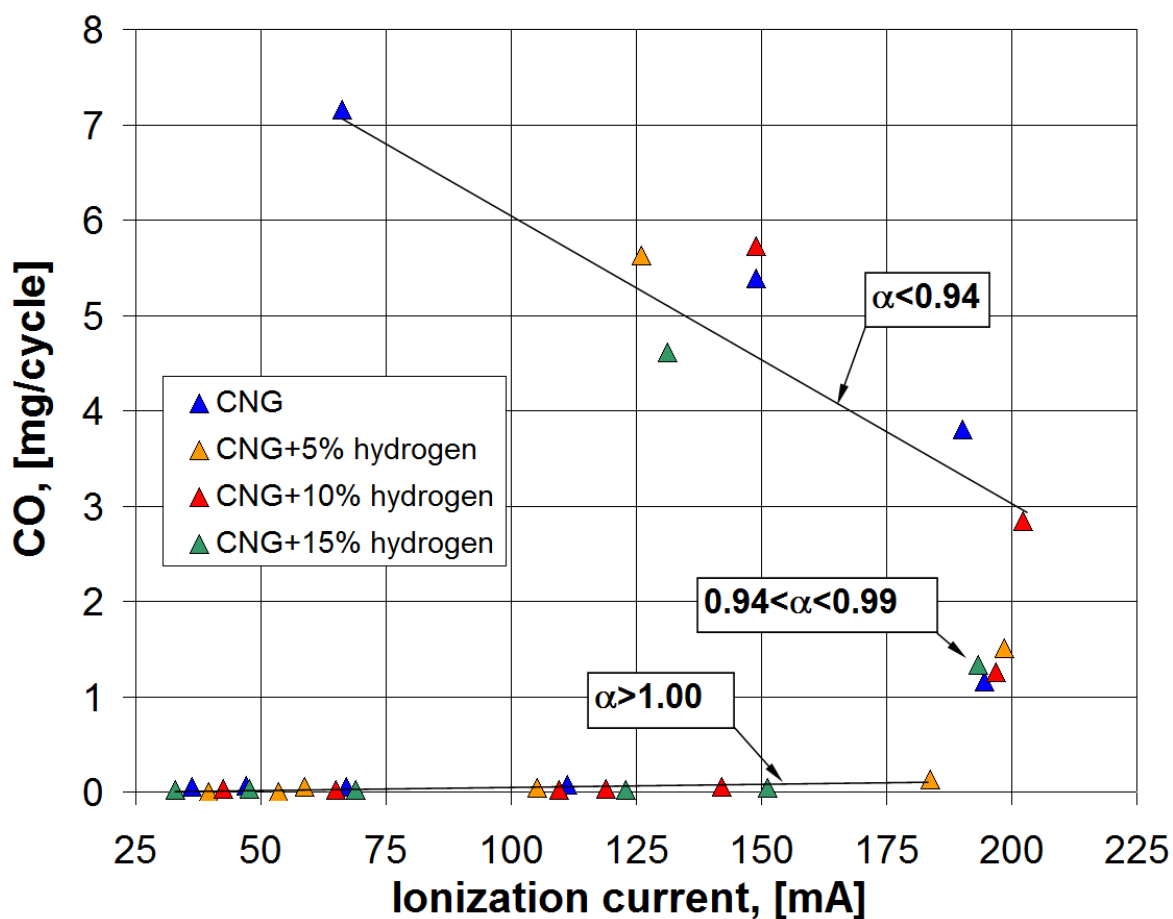


Рисунок 50 – Связь токсичности по оксиду углерода (CO) с характеристиками электропроводности пламени в конце основной фазы процесса горения

Выявлено, что снижение токсичности, которое предполагается за счет свойств водорода, способствующего активации процесса горения, оказывается недостаточно обоснованным. Водород, согласно термодинамическому анализу, влияет на изменение параметров процесса горения, что приводит к росту температур и уменьшению объема поверхностного слоя к концу процесса горения. Однако, данные исследования указывают на то, что аналогичное изменение токсичности можно достигнуть, модифицируя степень сжатия и точку воспламенения, без введения водорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован потенциал использования водорода в целях улучшения процесса горения природного газа. Основные результаты включают:

1. Применение водорода как энергоносителя для получения экологически безопасной энергии в стационарных установках сталкивается с рядом трудностей: от вопросов обеспечения безопасности, обусловленных его повышенной взрывоопасностью, до сложностей, связанных с его производством и масштабным распределением.
2. Исследование демонстрирует воздействие температурных условий на процессе горения на процессы генерации NOx и CO, принимая во внимание пропорцию между воздухом и топливом.
3. Выяснено, что, основываясь на температурных показателях и размере стенок в финальной фазе горения, можно судить о токсических свойствах отходящих газов, учитывая пропорцию смеси воздуха и топлива.
4. Исследования показали, что присутствие водорода оказывает значительное воздействие на термодинамические свойства процессов горения, в частности, изменяя уровни токсичных выбросов CH, NOx и CO двигателя. В то же время, ожидаемое уменьшение токсичности за счет сокращения доли углеводородного топлива при использовании водорода не подтвердилось. Вместо этого было выявлено, что дополнительное введение водорода в горючую топливную смесь при неизменных термодинамических параметрах не приводит к изменению уровней концентрации углеводородов ни в пристеночном слое, ни в зоне, непосредственно следующей за фронтом пламени, даже при существующем дефиците кислорода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pang et al., Review of engine cooling technologies for modern engines. Journal of automotive engineering, Vol 218, Part D (2004)
2. Wenzel, T., Singer, B.C. and Slott, R., 2000; Some issues in the statistical analysis of vehicle emissions. Journal of Transportation Statistics, September 2000. pp 1-14.
3. Baltusis, P. 2004; On-board vehicle diagnostics. Convergence Transportation Electronics Association, Paper 2004-21-0009
4. Fuller, G., 2006; London Air Quality 2004; London Air Quality Network Report 12; Environmental Research Group, London, UK.
5. Harrison, R.M., Tilling, R., Callen Romero, M.S., Harrad, S. and Jarvis, K. 2003; A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. Atmospheric Environment 37 (17): pp 2391-2402.
6. Shi, J.P., Harrison, R.M., Evans, D.E., Alam, A., Barnes, C. and Carter, G. 2002; A method for measuring particle number emissions from vehicles driving on the road. Environmental Technology, Volume 23, Number 1: pp 1-14
7. Hausberger, S; Rodler, J; Sturm, P; and Rexeis, M. 2003. Emission factors for heavy duty vehicles and validation by tunnel measurements. Atmospheric Environment 37: pp5237-5245.
8. Bishop, G.A. and Stedman, D.H. 1996; Measuring the emissions of passing cars. Accounts of chemical research, Volume 29, Number 10: pp 489-495.
9. Merryman E. L., Levy A. Nitrogen oxide formation in flames: The roles of NO₂ and fuel nitrogen, Symposium (International) on Combustion, Volume 15, Issue 1, 1975, Pages 1073-1083. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(75\)80372-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(75)80372-9)
10. England G.C., Heap M.P., Pershing D.W. et al. Mechanisms of NO_x formation and control: Alternative and petroleum-derived liquid fuels,

- Symposium (International) on Combustion, Volume 18, Issue 1, 1981, Pages 163-174. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(81\)80021-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(81)80021-5)
11. Matula R.A. (1973) Mechanism of Hydrocarbon Formation in Combustion Processes. In: Springer G.S., Patterson D.J. (eds) Engine Emissions. Springer, Boston, MA. DOI https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1983-2_3
 12. Dmitrenko, Y.M., Zhdanok, S.A., Klyovan, R.A. et al. Methane-to-hydrogen conversion in the filtration-combustion wave of rich methane-air mixtures, *J Eng Phys Thermophys* (2007) 80: 304. <https://doi.org/10.1007/s10891-007-0040-x>
 13. N. Rahmat, A. Abdullah, A. Mohamed. Recent progress on innovative and potential technologies for glycerol transformation into fuel additives: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 14, Issue 3 (2010). (Rahmat, 2010)
 14. M. Al-Hasan. Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energy Conversion and Management* V. 44 I. 9 (2003). (Al-Hasan, 2003)
 15. R. Silva, R. Cataluna. Effect of additives on the antiknock properties and Reid vapor pressure of gasoline. *Fuel* 84 (2005) 951–959. (Silva, 2005)
 16. G. Genchi, E. Pipitone. Octane Rating of Natural Gas-Gasoline Mixtures on CFR Engine. 2014 SAE International doi:10.4271/2014-01-9081. (Genchi, 2014)
 17. S. MacAllister, J. Chen, y. Fernandez. *Fundamentals of Combustion Processes*. 2011. ISBN: 978-1-4419-7942-1. (MacAllister, 2011)
 18. Jimenez, J.L., Koplow, M.D., Nelson, D.D., Zahniser, M.S. and Schmidt, S.E. 1999; Characterisation of on-road vehicle NO emissions by a TILDAS sensor. *Journal of the Air and Waste Management Association* 49: pp463-470
 19. Moosmuller, H., Mazzoleni, C., Barber, P.W., Kuhns, H.D., Keislar, R.E. and Watson, J.G. 2003; On-road measurement of automotive particulate emissions by ultraviolet lidar and transmissometer: *Instrument. Environmental Science and Technology* 37: pp4971-4978.

20. Bishop, G.A., Stedman, D.H., De La Garza Castro, J., and Davalos, F.J. 1997; On- road remote sensing of vehicle emissions in Mexico; *Environmental Science and Technology* 31: pp 3505–3510.
21. Bradley, K.S., Brooks, K.B., Hubbard, L.K., Popp, P.J. and Stedman, D.H. 2000; Motor-vehicle fleet emissions by OP-FTIR. *Environmental Science and Technology* 34: pp 897-899.
22. Stephens, R.D., Giles, M., McAlinden, K., Gorse, R.A., Hoffman, D. and James, R. 1997; An analysis of Michigan and California CO remote sensing measurements. *Journal of the Air and Waste Management Association* 47: pp 601-607.
23. Pokharel, S.S., Bishop, G.A. and Stedman, D.H. 2002; An on-road motor vehicle emissions inventory for Denver: An efficient alternative to modeling. *Atmospheric Environment* 36: pp5177–5184.
24. R.J. North “Assessment of real-world pollutant emissions from a light duty diesel vehicle”. PhD Thesis, University of London, 2006.
25. Younglove, T., Scora G. and Barth M. 2005; Designing on-road vehicle test programs for the development of effective vehicle emission models. *Transportation Research Record No. 1941*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp 51-59.
26. Arteconi, A., et al., (2010), "Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe", *Appl.Energy*, Vol.87 (6), pp. 2005-2013.
27. Lindfeldt, E.G., et al., (2010), "Strategies for a road transport system based on renewable resources – The case of an import-independent Sweden in 2025", *Appl.Energy*, Vol.87 (6), pp. 1836-1845.
28. Y. Saboohi, H. Farzaneh, Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 10, October 2009, Pages 1925-1932, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.017.)
29. Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Kenneth Karlsson, 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth, *Applied Energy*, In

Press, Corrected Proof, Available online 31 March 2010, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.03.001.

30. Smit, R., et al., (2010), "Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis", *Atmos. Environ.*, Vol.44 (25), pp. 2943-2953.
31. Sharad, G. (2012), "Impacts of traffic-flows on vehicular-exhaust emissions at traffic junctions", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.17 (1), pp. 21-27.
32. Rabl, A. and de Nazelle, A., (2012), "Benefits of shift from car to active transport", *Transp. Policy*, Vol.19 (1), pp. 121-131.
33. Su, J., et al., (2011), "Non-methane volatile organic compound emission inventories in Beijing during Olympic Games 2008", *Atmos. Environ.*, Vol.45 (39), pp. 7046-7052.
34. Wang, H., et al., (2010), "Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005", *Environmental Pollution*, Vol.158 (2), pp. 394-400.
35. Haydar, F. and Padiaditi, K. 2010. Evaluation of the environmental impact assessment system in Syria. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(6), pp.363-370.
36. Ou, X., Yan, X., Zhang, X. and Liu, Z. 2012. Life-cycle analysis on energy consumption and GHG emission intensities of alternative vehicle fuels in China. *Applied Energy*, 90(1), pp.218-224.
37. Gunter P. Merker and Rüdiger Teichmann. "Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise und alternative Antriebssysteme Verbrennung, Messtechnik und Simulation". In: Springer Vieweg Wiesbaden, 2018.
38. Philip Müller. Thermische und mechanische Festigkeitsberechnung eines Zylinderkopfs für einen Otto-Forschungsmotor mit zentral angeordnetem Injektor. 2013.
39. Andreas Züttel. "Hydrogen storage methods". In: *Die Naturwissenschaften* 91 (Apr. 2004), pp. 157–72. DOI: 10.1007/s00114-004-0516-x.

40. Adetokunboh T. Bakenne William J. Nuttall. "Fossil Fuel Hydrogen. Technical, Economic and Environmental Potential". In: Springer Cham, 2019.
41. Heywood, John B., Internal combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill International Editions -1988
42. McGahan, Paul., PM, Estimation of On-Road Vehicle Fuel Consumption and Emissions using Analysis of OBD Signals, 4th Year Mechanical Engineering Project, BEng, 07/04/2006.
43. Directive 98/69/EC of The European Parliament and of the council of 13 October 1998, Relating to measures to be taken against pollution by emission from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC
44. Barone, Stefano. Statistics-Driven Development of OBD Systems; An Overview, Quality and Reliability Engineering International, 2006, vol 22, 615-628
45. Sturm et al. Determinaton of Traffic emissions – intercomparison of different calculation methods, the science of the total environment, 189/190 (1996) 187-196
46. Council directive of 20 March 1970 on the approximation of the laws of the Member States on measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles (2004), European Union.
47. Ludykar et al., Cold start emissions at + 22, -7 and -20 C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, the Science of the Total Environment 235 (1999) 65-69
48. Abdel- Rahman, A.A., On the emissions from internal combustion engines: A review. International Journal of Energy Research volume 22 (1998), 483-513
49. Pierson et al. C, Comparison of the SCAQS tunnel study with other on-road emissions data. Journal of Air Waste Management Association 40, 1495-1504
50. Wang, Q., H. Huo, K. He, Z. Yao and Q. Zhang, "Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities", Transportation Research Part D: Transport and Environment, 13, 289-297, 2008.

51. Hao Cai, Shaodong Xie, “Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005”, *Atmospheric Environment*, Volume 41, Issue 39, December 2007, Pages 8963-8979
52. Ludykar et al., Cold start emissions at + 22, -7 and -20 C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, *the Science of the Total Environment* 235 (1999) 65-69
53. . Saerens, J. Vandersteen, T. Persoons, J. Swevers, M. Diehl, E. Van den Bulck, Minimization of the fuel consumption of a gasoline engine using dynamic optimization, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 9, September 2009, Pages 1582- 1588, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.022.
54. Wenzel, T. 2003; Use of Remote Sensing measurements to evaluate vehicle emission monitoring programs: results from Phoenix, Arizona. *Environmental Science and Policy* Volume 6, Issue 2: pp 153-166.
55. Wielenmann et al., Regulated and unregulated diesel and cold start emissions at different temperatures, *Atmospheric Environment*, vol 39 (2005), 2433-2441)
56. Myung et al. Experimental investigation of the effect of thin- wall substrates and spark timing on total hydrocarbon emissions during cold-start for super-ultra low-emission application, *Journal of Automobile Engineering*, Vol 218, Part D (2004)
57. P. G. Aleiferis and M. F. Rosati, “Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine,” *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 7, pp. 2500–2515, 2012.
58. Z. Huang, J. Wang, B. Liu, K. Zeng, J. Yu, and D. Jiang, “Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas–hydrogen blends under different ignition timings,” *Fuel*, vol. 86, no. 3, pp. 381–387, 2007.
59. J. Wang, Z. Huang, Y. Fang, B. Liu, K. Zeng, H. Miao, and D. Jiang, “Combustion behaviors of a direct-injection engine operating on various

- fractions of natural gas–hydrogen blends,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 3555–3564, 2007.
60. D. Kabat and J. Heffel, “Durability implications of neat hydrogen under sonic flow conditions on pulse-width modulated injectors,” *International Journal of Hydrogen Energy - INT J HYDROGEN ENERG*, vol. 27, pp. 1093– 1102, 2002.
 61. K. Yamane, M. Nogami, Y. Umemura, M. Oikawa, Y. Sato, and Y. Goto, “Development of high pressure h₂ gas in- jectors, capable of injection at large injection rate and high response using a common-rail type actuating system for a 4-cylinder, 4.7-liter total displacement, spark ignition hydrogen engine,” *SAE Technical Papers*, 2011.
 62. D. R. Pearl, “O-ring seals in the design of hydraulic mechanisms,” *SAE Technical Paper*, vol. 470247, p. 10, 1947.
 63. K. Alvine, V. Shutthanandan, W. Bennett, C. Bonham, D. Skorski, S. Pitman, M. Dahl, and C. Henager, “High- pressure hydrogen materials compatibility of piezoelectric films,” *Applied Physics Letters*, vol. 97, pp. 221911– 221911, 2010.
 64. J. Topinka, M. D. Gerty, J. Heywood, and J. Keck, “Knock behavior of a lean-burn, h₂ and co enhanced, si gasoline engine concept,” *SAE Technical Papers*, 2004.
 65. S. Verhelst, Sierens, and S. Verstraeten, “A critical review of experimental research on hydrogen fueled si engines,” *SAE Technical Papers*, 2006.
 66. R. J. Natkin, A. R. Denlinger, M. Younkins, A. Z. Weimer, S. Hashemi, and A. T. Vaught, “Ford 6.8l hydrogen ic engine for the e-450 shuttle van,” *SAE Technical Papers*, 2007.
 67. P. Huyskens, S. Oost, P. J. Goemaere, K. Bertels, and M. Pecqueur, “The technical implementation of a retrofit hydrogen pfi system on a passenger car,” *SAE Technical Papers*, 2011.
 68. H. Osamura and N. Abe, *Development of New Iridium Alloy for Spark Plug Electrodes*, vol. 108. 1999.

69. L. M. Das, "Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 27, no. 5, pp. 479–487, 2002.
70. B. L. Salvi and K. A. Subramanian, "Experimental investigation on effects of compression ratio and exhaust gas recirculation on backfire, performance and emission characteristics in a hydrogen fuelled spark ignition engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 13, pp. 5842–5855, 2016.
71. J. W. Heffel, "Nox emission reduction in a hydrogen fueled internal combustion engine at 3000 rpm using exhaust gas recirculation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 11, pp. 1285–1292, 2003.
72. J. W. Heffel, "Nox emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500rpm using exhaust gas recirculation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 8, pp. 901–908, 2003.
73. M. Berckmuller and H. Rottengruber, "Potentials of a charged si-hydrogen engine," *Proceedings of the International Hydrogen Energy Forum*; 2004 May 25-28; Beijing, China, pp. 59–67, 2004.