

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

«Тольяттинский государственный университет»
ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(наименование профиля магистерской программы)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Оценка возможностей снижения оксидов азота в отработавших газах

ПДВС воздействием промотирующей добавкой водорода на

процесс сгорания

Студент(ка)

Д.В. Лиманова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель магистерской
программы

д.т.н., профессор А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

« _____ » июня 2018 г.

Допустить к защите

Зав. кафедрой
«ЭМиСУ»

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« » июня 2018 г.

Тольятти 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1 Обзор известных источников по возможностям снижения токсичности ОГ за счет применения водорода в ПДВС	7
1.1 Обзор методов исследования процесса сгорания в поршневых ДВС	8
1.2 Нормативы по ограничению вредных выбросов	9
1.3 Методы снижения токсичности отработавших газов двигателя внутреннего сгорания	12
1.4 Рециркуляция выхлопных газов	14
1.5 Использование водорода в качестве способа воздействия на рабочий процесс для снижения токсичности отработавших газов ПДВС	15
1.6 Влияние температуры сгорания на концентрацию окислов азота NO_x в отработавших газах ДВС	16
1.7 Модели оценки концентрации оксидов азота в трудах отечественных и зарубежных исследователей	17
1.8 Выводы по Главе 1	25
ГЛАВА 2 Описание оборудования использованного в эксперименте и методики обработки экспериментальных данных	28
2.1 Описание экспериментальной установки УИТ-85.....	28
2.2 Экспериментальная установка ВАЗ-2111.....	30
2.3 Методика проведения экспериментального исследования, и оценка достоверности получаемых экспериментальных данных.....	33
ГЛАВА 3 Результаты стендовых исследований по теме диссертационного исследования и их анализ	39
3.1 Результаты экспериментального исследования, проведенного на УИТ-85	39
3.2 Влияние добавки водорода в сжатый природный газ на рабочий	

процесс и концентрацию оксидов азота в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием.....	44
3.3 Выводы по главе 3.....	49
ГЛАВА 4 Оценка возможностей снижения оксидов азота в отработавших газах ПДВС воздействием промотирующей добавкой водорода на процесс сгорания	50
4.1 Расчет температуры газов в цилиндре ДВС	50
4.2 Влияние температуры на образование оксидов азота в отработавших газах поршневых ДВС с искровым зажиганием	54
4.3 Методика определения концентрации NO_x	61
4.3.1 Определение состава газообразного вещества в цилиндре установки; определение массы топлива в цилиндре за цикл и его температуры	62
4.3.2 Расчет политропного сжатия	63
4.3.3 Проведение теплового расчета по методике Вибе	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	67

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Увеличение количества транспортных средств с установленными на них силовыми агрегатами, составной частью которых является ДВС, приводит к ухудшению экологической обстановки. Поскольку в составе ОГ ДВС присутствуют высоко опасные токсичные компоненты, в числе которых компонент второго класса опасности – NO_x , а наибольшее количество транспортных средств сконцентрировано в районах плотной застройки высоко этажными жилыми и офисными зданиями, существует необходимость уменьшения токсичности ОГ ДВС для снижения негативного влияния вредных веществ на организм человека и окружающую среду. Одним из путей уменьшения токсичности ОГ при сохранении относительно низких затрат на изменение конструкции является применение альтернативного топлива, в качестве которого в данной работе рассмотрен сжатый природный газ. Добавка в топливо активаторов горения позволяет улучшить процесс сгорания, обеспечивая увеличение скорости распространения пламени и полноты сгорания, что позволяет перейти на работу двигателя на обедненных составах ТВС, уменьшая при этом эмиссию вредных веществ из ДВС. В качестве активатора горения в проведенном исследовании использован водород, который добавлялся в малых долях (до 15% по массе) в основное топливо.

Выявление зависимостей температуры, давления и характеристик тепловыделения по углу поворота коленвала при различных составах ТВС на содержание NO_x в ОГ ДВС позволяет создать модели оценки концентрации окислов азота. Подобные модели необходимы для предварительной оценки уровня эмиссии токсичных веществ при проектировании новых автомобилей и силовых агрегатов, а также при модернизации уже существующих, что позволит сократить объем опытных работ по отработке и оптимизации систем нейтрализации ОГ, количество калибровочных и сертификационных испытаний автомобиля по токсичности ОГ.

Целью работы является оценка возможностей снижения оксидов азота в отработавших газах ПДВС воздействием промотирующей добавкой водорода на процесс сгорания.

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

1. провести анализ существующих моделей определения содержания оксидов азота в отработавших газах;
2. провести анализ проведенных экспериментов для выявления возможностей снижения оксидов азота в отработавших газах поршневых двигателей с искровым зажиганием.

Объект исследования: процесс сгорания в поршневых двигателях с искровым зажиганием.

Предмет исследования: механизм образования оксидов азота в отработавших газах поршневых двигателей с искровым зажиганием.

Методы исследования. В диссертационном исследовании применялся метод прикладного научного исследования связанный с аналитическим и математическим анализом существующих методов расчета оксидов азота в отработавших газах, а также метод математического моделирования, позволяющий проводить прогнозирование концентрации оксидов азота по разработанным математическим подходам.

Достоверность полученных результатов исследования обусловлена большим объемом обработанных известных экспериментальных данных, применением методов статистической обработки данных и не противоречивостью полученных результатов современным теориям по расчету оксидов азота в поршневых ДВС.

Научная новизна исследования

Заключается в проведенной оценке возможностей снижения оксидов азота в отработавших газах ПДВС воздействием промотирующей добавкой водорода на процесс сгорания.

Практическая значимость работы:

Полученные результаты позволяют проводить оценку возможностей снижения оксидов азота в отработавших газах ПДВС при использовании водорода в качестве активатора процесса сгорания.

На защиту выносятся:

1. Результаты обзора существующих моделей для расчета оксидов азота в отработавших газах поршневых ДВС с искровым зажиганием.
2. Закономерности изменений условий сгорания углеводородного топлива обеспечивающие снижение токсичности отработавших газов по оксидам азота.

Апробация работы. Основные положения магистерской диссертации докладывались и обсуждались на конференции, в 2017-18 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 30 наименований. Работа изложена на 70 страницах машинописного текста, иллюстрированного 6 таблицами и 35 рисунками, общий объем составляет 70 страницы.

ГЛАВА 1 Обзор известных источников по возможностям снижения токсичности ОГ за счет применения водорода в ПДВС

В современном развитом, технологически развитом мире, где первоклассным задачей является постоянный экономический рост, численность общества выросла примерно на много миллионов человек в течение последних трех лет, нельзя представить без роста рабочей силы производительность, что достигается за счет усовершенствования применяемых технологий. Фактором, который обеспечил технологический скачок, необходимый для развития человечества, было изобретение и постоянное улучшение поршневых двигателей - машин, которые преобразуют энергию топлива в работу. К настоящему времени в мире используется более миллиарда искусственных двигателей внутреннего сгорания, которые широко применяются как один из компонентов энергоблоков. В частности, двигатели используются в автомобильном транспорте и др. Количество транспортных средств, оборудованных энергоблоками с ДВС, постоянно растет, например, в России за 18 лет с 1992 года флот вырос в 2,4 раза [1, 4, 6]. В дополнение к очевидным преимуществам поршневых двигателей внутреннего сгорания, они имеют значительный недостаток, что проявляется в значительной концентрации токсичных веществ, вредных для человека тело в составе выхлопных газов. Доля дорожного транспорта составляет 50 ... 60% выбросов загрязняющих веществ от выхлопных газов, а в больших городах - больше 90% [8, 14, 9]. Основными и наиболее опасными компонентами выхлопных газов являются оксиды азота. В условиях повышенной концентрации технологии в густонаселенных районах с плотной развитием инфраструктуры. Поэтому сокращение опасных веществ в выхлопных газах является важной задачей, которое должно быть уделено внимание производителям и потребителям двигателей внутреннего сгорания, а также государственным и наднациональным регуляторам.

1.1 Обзор методов исследования процесса сгорания в поршневых ДВС

Наиболее распространенным методом исследования качества протекания рабочего процесса в ДВС, в том числе и процесса сгорания, сегодня является индицирование, т.е. определение давления в цилиндре двигателя.

Указанный метод дает косвенное представление о картине распространения пламени в камере сгорания выраженное через мгновенное индикаторное давление.

Используя ряд методик совместной обработки указанных диаграмм, например, методики обработки диаграмм предложенной И.И. Вибе [5] можно получить представления о характере протекания цепных реакций, например, в виде изменения плотности «активных центров» в процессе сгорания или интегрального показателя сгорания - коэффициента m . Однако, введенное понятие «активных центров» И.И. Вибе не полностью согласуется с традиционными представлениями о цепных реакциях. Используя предложенную методику, можно получить лишь характеристики процесса горения, выраженных в условных единицах (активные центры), привязать их к известным количественным характеристикам процесса сгорания, принятых сегодня затруднительно и требует большого количества экспериментальных работ в этом направлении.

Горение частично перемешанных систем при достаточно низких температурах рассматривается как возможность одновременного снижения образования NO_x и сажи. Чтобы понять суть этих явления, необходимо иметь проверенную детальную модель, разработанную для условий низких температур. Для исследования этих процессов режиме on-line (развивающимися во времени процессами горения) требуются соответствующие датчики [7]. Хемилюминесценция пламени является подходящим способом для слежения за процессом горения, поскольку

образование соединений в возбужденном состоянии неразрывно связано с кинетикой, химией пламени. Интенсивность хемилюминесценции и отношения интенсивностей с участием в основном OH^* , CN^* и C_2^* были проанализированы и соотнесены со свойствами пламен, и результаты подтверждают возможность применения хемилюминесценции для исследования процессов горения. Однако излучение частиц - это результат сложных взаимодействий, реагирующих или инертных динамических процессов. Частицы в возбужденном состоянии, ответственные за хемилюминесценцию, образуются в химических реакциях, которые еще только исследуются [7]. Быстрое распределение энергии в возбужденных молекулах практически не изучено и напрямую не отражается в спектре хемилюминесценции, где передача энергии в столкновениях играет важную роль. Таким образом, регистрируемое излучение является результатом взаимодействия «кинетических» и затухающих реакций со «спектроскопическими» эффектами гашения за счет столкновения и передачи электронной, колебательной и вращательной энергии. Изучение этих явлений может опираться на ранние исследования эффектов соударения в экспериментах с использованием техники LIF [7, 8], с той разницей, что вместо одного энергетического уровня, возбужденного лазером, в результате химических реакций образуется ряд заселенных состояний.

1.2 Нормативы по ограничению вредных выбросов

Регулирование выбросов оксидов азота в выхлопные газы государственных и наднациональных органов является наиболее эффективным способом заставить автопроизводителей проводить разработку средств нейтрализации выхлопных газов. В случае несоблюдения норм токсичности природоохранные органы при государственных органах могут запретить продажу продукции автопроизводителей, продукция которых не соответствует принятым нормам.

Контроль за выполнение норм токсичности со стороны государств заключается в принятии норм токсичности, в которых допустимая концентрация опасных веществ в выхлопных газах двигателей стандартизирована в соответствии со стандартами, указанными в стандартах. Методы испытаний различаются в зависимости от стандартов, но в целом они сводятся к испытаниям автомобилей на токсичность, оснащенных системами нейтрализации отработавших газов, в лабораториях, где автомобиль устанавливается на барабаны, и водитель управляет транспортным средством по заданному ездовому циклу. Замеренные значения токсичности ОГ двигателя автомобиля, которые определяются газоанализатором, и сравниваются с нормированными значениями. Существующие ездовые циклы, представляют собой графическое воспроизведение движения автомобилей в городских и пригородных условиях. Указанные циклы учитывают движение только при определенных скоростных и нагрузочных условиях, что дает широкие возможности по снижению затрат на разработку систем нейтрализации отработавших газов в обход правил регулирующих органов. Эта проблема частично решается в трех направлениях: введение норм токсичности ЕВРО-6с, ужесточение в ЕС норм токсичности, новый ездовой цикл WLTC, в котором расписание проверок будет генерироваться случайным образом в зависимости от типа транспортного средства и особенностей его силового агрегата, с помощью специальных статистических программ.

Правила EOBD регулируют выбросы опасных веществ в случае отказа или неэффективной работы деталей, связанных с работой каталитического нейтрализатора и ДМРВ, или датчика давления всасываемого воздуха, датчиков кислорода, катушек и свечей зажигания и т.д. Постепенно пересматриваются и ужесточаются государственные нормы по выбросам токсичных компонентов выхлопных газов, что можно увидеть на примере норм токсичности в еврозоне для легковых автомобилей с бензиновым или

дизельным двигателем для ездового цикла, которые частично представлены в таблице 1.1 [10, 11, 12].

Таблица 1.1 – Существующие нормы токсичности отработавших газов для бензиновых двигателей с искровым зажиганием при использовании в автомобилях менее 3,5 тонн

	Токсичность ОГ, г/км					Твердые частицы	
	СН	СО	СН	СО	СН	СО	СН
EURO -1	–	2,72	–	–	0,97	–	–
EURO -2	–	2,20	–	–	0,50	–	–
EURO -3	0,20	2,30	0,15	–	–	–	–
EURO -4	0,10	1,00	0,08	–	–	–	–
EURO -5	0,10	1,00	0,06	0,068	–	5	–
EURO -6b	0,10	1,00	0,06	0,068	–	4,5	$6 \cdot 10^{12}$
EURO -6c	0,10	1,00	0,06	0,068	–	4,5	$6 \cdot 10^{11}$

Как видно из таблицы 1.1, с ЕВРО-1 в вплоть до ЕВРО-5 требования к выбросам NOx были ужесточены, и с ЕВРО-3 требованиям для оксидов азота были наиболее строгими, что указывает на необходимость увеличения затрат производителей на разработку принципиально новой системы для нейтрализации выхлопных газов. Данная система должна и после 160 000 км пробега эффективно преобразовывать опасные продукты сгорания. Таким образом, использование дополнительных методов снижения выбросов выхлопных газов, в частности по NOx, наряду с использованием каталитических систем является актуальной задачей. В США существует несколько стадий нормирования токсичности выхлопных газов в зависимости от типа транспортного средства. Нормализация выбросов ВВ позволяет снизить затраты на здоровье населения. Это возможно при

выполнении еще более жестких требований к токсичности выхлопных газов при обязательном условии использования каталитических систем нейтрализации выхлопных газов, что приведет к дополнительным затратам для автопроизводителей.

1.3 Методы снижения токсичности отработавших газов двигателя внутреннего сгорания

На условия для формирования токсичных веществ в выхлопной системе автомобиля также влияют все внешние и внутренние факторы такие как (мощность и крутящий момент). Токсичность выхлопных газов может быть снижена за счет воздействия на рабочий процесс за счет улучшения формы камеры сгорания, продуктов, связанных с впускными и выпускными системами, системами подачи топлива. Токсичность также может быть снижена при использовании альтернативных видов топлива и поддержания эффективного технического состояния двигателя внутреннего сгорания во время операции [7]. Воздействие на рабочий процесс и оптимизация формы камеры сгорания являются наиболее эффективными способами снижения токсичности выхлопных газов. Состав топливной смеси оказывает наибольшее влияние на образование токсичных веществ в выхлопных газах. На рисунке 1.1 показана зависимость концентрации токсичных веществ в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

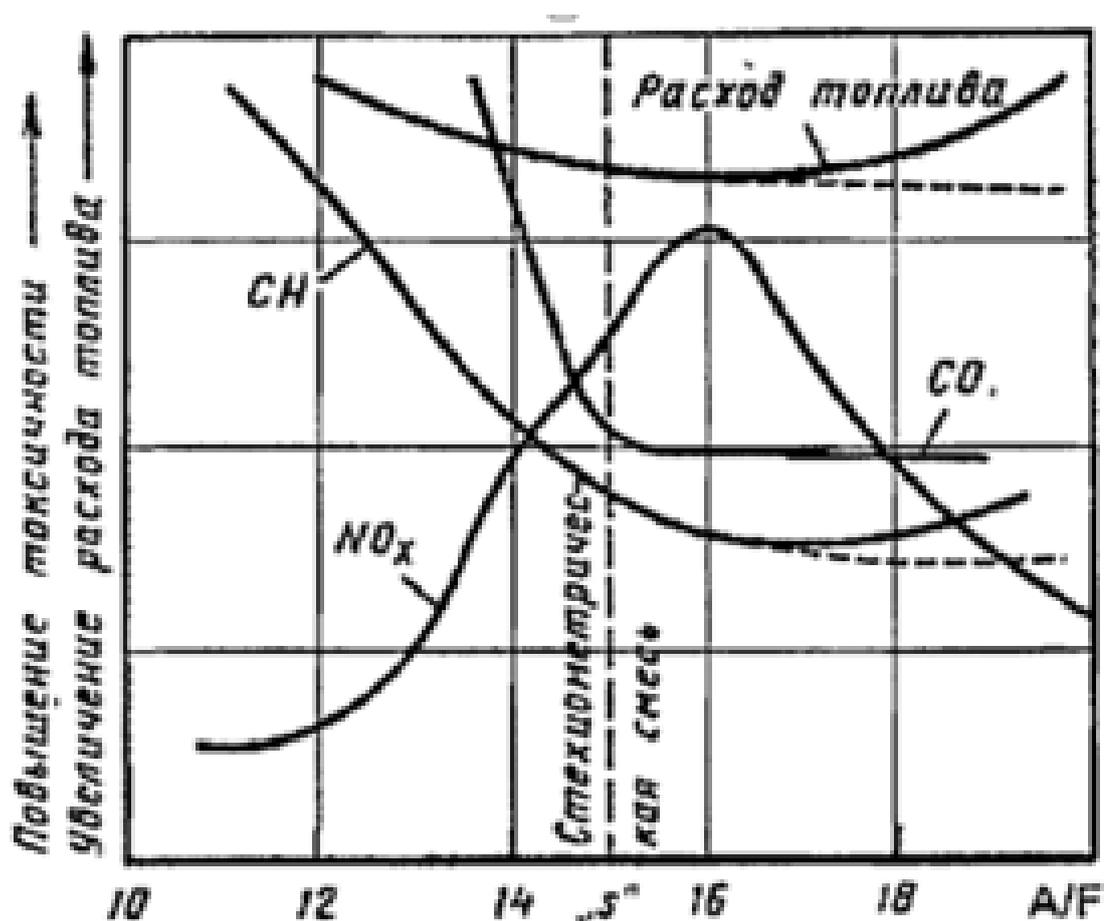


Рисунок 1.1 - Зависимость концентрации токсичных веществ от состава смеси.

Отклонение угла опережения зажигания от оптимального угла для данного режима в верхней или нижней части приводит к увеличению концентрации NO_x . Снижение температуры воздуха на входе (до $18 \dots 20^\circ \text{C}$) приводит к снижению оксидов азота и снижению требований к детонационной стойкости бензина. Но снижение температуры воздуха на входе приводит к уменьшению испаряемости топлива, что приводит к не сгоранию топлива в выхлопной системе и увеличению концентрации несгоревших углеводородов. Повышение входного давления приводит к увеличению содержания NO_x , что связано со снижением доли остаточных газов в цилиндре двигателя, иными словами, уменьшается эффект "внутренней рециркуляции" выхлопных газов [6]. Для снижения выбросов токсичных веществ целесообразно использовать обедненные смеси, при этом

необходимо интенсифицировать процесс сгорания. Это может быть достигнуто с помощью применения форкамерного зажигания или путем разделения заряда. В этом случае образование оксидов азота в богатой зоне будет ограничено недостатком кислорода, а в бедной более низкой температурой. [6, 7, 15]. В случае использования форкамерного зажигания обеспечивается стабильное сгорание при общем $\alpha_{\Sigma} = 1.4 \dots 1.55$, что обеспечивает снижение CO и NOx на 1,5 ... 1,7 раза [10].

1.4 Рециркуляция выхлопных газов

Часто применяемым способом сокращения выбросов NOx в двигателях внутреннего сгорания является рециркуляция выхлопных газов. Рециркуляция остаточных газов обеспечивает заполнение цилиндра двигателя инертными отработавшими газами, что снижает температуру сгорания, тем самым достигая уменьшение выбросов по NOx на 55 ... 75 % [44, 70]. На рис. 1.2 показано влияние степени рециркуляции выхлопных газов на концентрацию NOx.

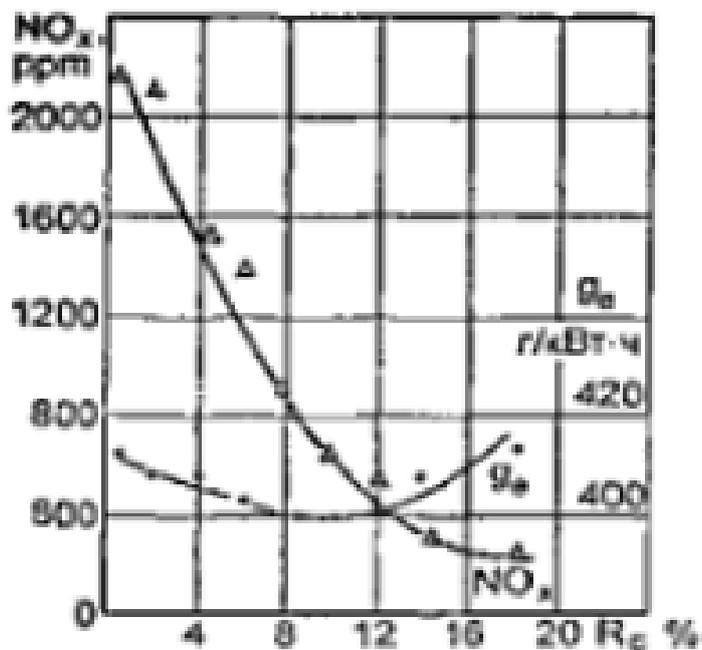


Рисунок 1.2 - Зависимость концентрации NOx от степени рециркуляции выхлопных газов

1.5 Использование водорода в качестве способа воздействия на рабочий процесс для снижения токсичности отработавших газов ПДВС

Водород в качестве добавки к основному углеводородному топливу, которым могут являться бензин или сжиженный и сжатый газ, не однозначно влияет на токсичность по оксидам азота в отработавших газах. Как правило водород повышает скорость распространения пламени, что сказывается на большей скорости тепловыделения и, следовательно, к большей термической эффективности цикла, но это же приводит к повышению максимальной температуры в процессе сгорания и, следовательно, к повышению доли термических оксидов азота в продуктах сгорания. Поэтому в литературе зачастую имеется мнение, что добавка водорода к основному углеводородному топливу ухудшает характеристики по токсичности оксидами азота, при этом во внимание берется тот факт, что с добавкой водорода угол опережения зажигания изменяется незначительно, а мощностные показатели увеличиваются. Но в тоже время имеется ряд работ [1, 13, 19] показывающих возможности снижения токсичности по оксидам азота при добавке водорода за счет активным варьированием углом опережения зажигания и положением дроссельной заслонки, что позволяет проводить процесс сгорания немного за верхней мертвой точкой и при меньших значениях температуры, но за счет большей скорости сгорания добиваться эффективного и полного сгорания.

1.6 Влияние температуры сгорания на концентрацию окислов азота NO_x в отработавших газах ДВС

На рисунке 1.3 показана зависимость концентрации окислов азота, кислорода и максимальной температуры сгорания от коэффициента избытка воздуха. При составе ТВС $\alpha=1,05\dots 1,15$ наблюдается максимальная

токсичность по оксидам азота из-за ещё высоких температур за фронтом пламени и наличием свободного кислорода.

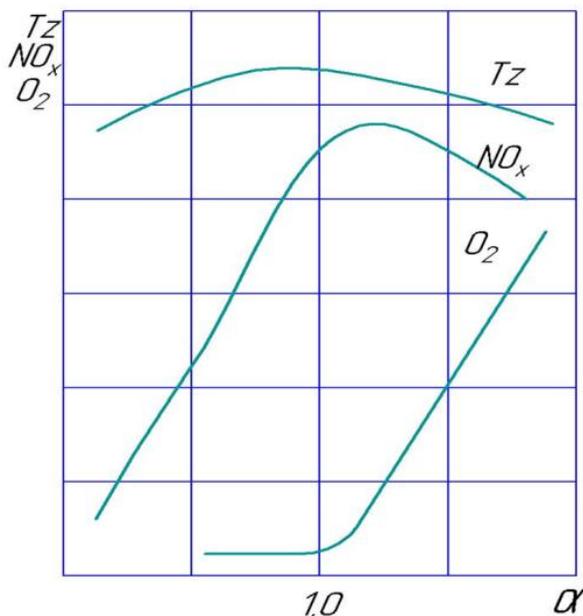


Рисунок 1.3 – Изменение параметров процесса сгорания от состава смеси

1.7 Модели оценки концентрации оксидов азота в трудах отечественных и зарубежных исследователей

Исторически сложилось так, что именно NO_x и механизм их образования стали весьма интересным объектом для науки, в частности, в связи с практическим применением теории цепных реакций, разработанной Н.Н. Семёновым (к сожалению аналогичного метода до сих пор не разработано для несгоревших углеводородов и ряда других составляющих продуктов сгорания углеводородных топлив).

Несомненный приоритет в разработке вопросов образования NO_x имеют работы Зельдовича Я.Б. (рисунок 1.4), результаты которых изложены, в частности, в книге: [Окисление азота при горении], М.: Наука, 1947], написанной совместно с Садовниковым П.Я. и Франк-Каменецким Д.А. Данная работа на долгое время определила направление развития научных

исследований в этом направлении и не потеряла актуальности до настоящего времени [6, 7].

Эта публикация и последовавшие за ней дальнейшие разработки обосновали «термическую» схему, которая стала основой аналогичных исследований в течение длительного времени, как в СССР так и за рубежом. Дальнейшие исследования, выполненные в течение 60-80 гг. XX века позволили выявить ряд новых данных и соответствующих им химических механизмов, в частности, «быстрых» и «топливных» NO. Этому способствовали не только успехи химической физики, но и прогресс вычислительной техники, позволившей ставить и решать более сложные задачи.

Известна работа Фенимора, где предложен механизм «быстрого» образования NO_x . В проводимых им опытах было замечено, что при достижении измерительным зондом фронта пламени снизу по течению со стороны свежей углеводородо-воздушной смеси, концентрация NO не достигала нулевого значения, как предполагалось механизмом Зельдовича Я.Б. Механизм Фенимора значительно сложнее термического вследствие образования свободного радикала CN . В результате их взаимодействия образуется цианисто-водородная кислота HCN , которая далее входит в реакцию с радикалом N и последующим образованием NO_x . Образованию свободного радикала CN предшествует возникновение ацетилена C_2H_2 который в свою очередь преобладает в пламенах при горении богатых и обогащенный углеводородо-воздушной смесей.

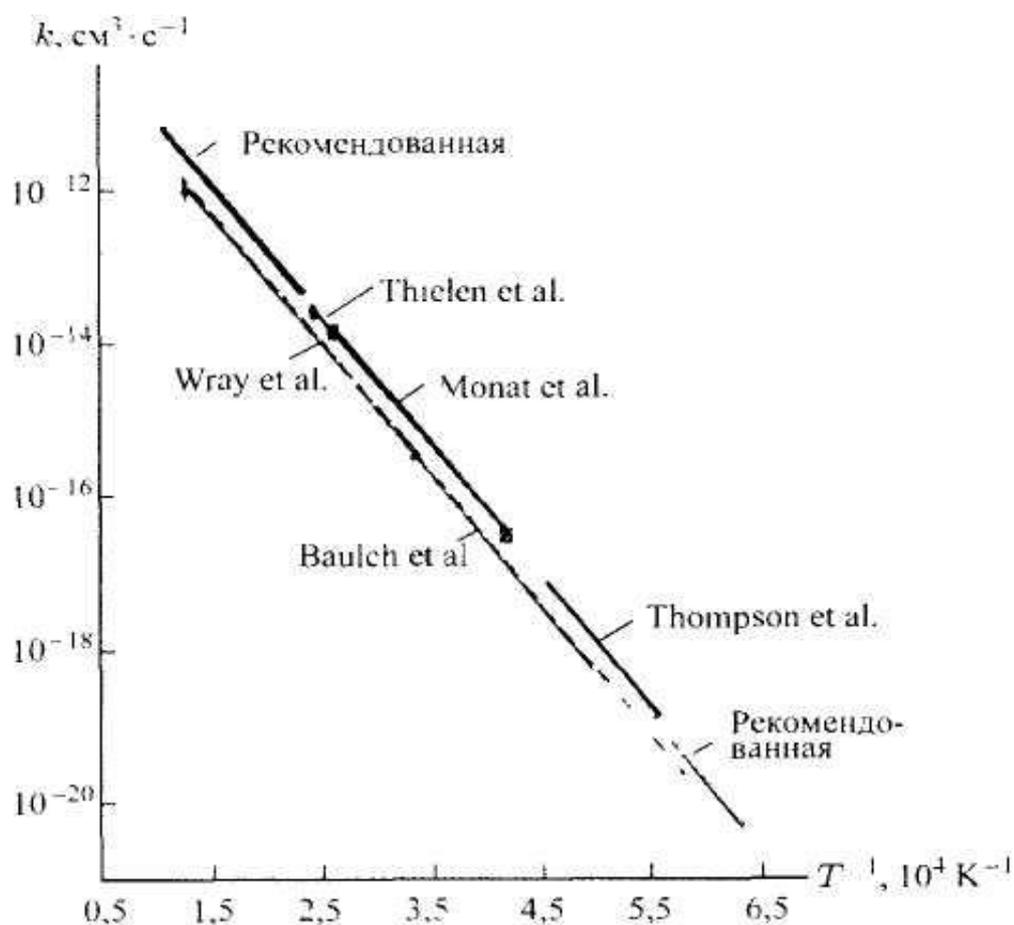


Рисунок 1.4– Аррениусовская зависимость $k = k(1/T)$ для реакции $O + N_2 \rightarrow NO + N$

Вследствие относительно малых значений энергии активации, около 75 кДж/моль при $T \approx 9000 \text{ K}$ (для термических NO_x , 318 кДж/моль при $T = 38200 \text{ K}$), «быстрые» NO_x образуются при температуре приблизительно 1000 °К непосредственно во фронте пламени, причем процесс образования начинается у передней границы фронта пламени.

Исследования [10] (рисунок 1.5) показали, что концентрация «быстрых» NO_x при сгорании богатых углеводородо-воздушной смесей может превышать концентрацию термических NO_x , однако при тех составах ТВС которые находятся во внутрицилиндровом пространстве поршневых бензиновых ДВС доля «быстрых» NO_x от общей концентрации составляет не более 10 %.

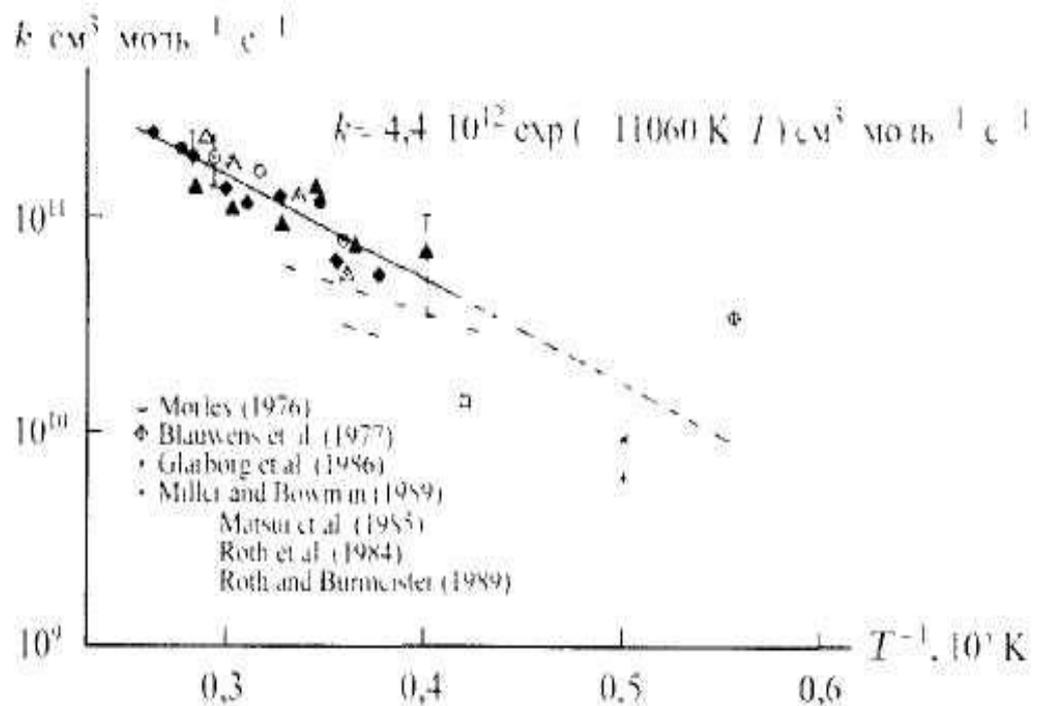
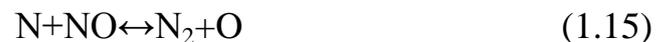


Рисунок 1.5 – Константы скорости для реакции $\text{CH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{N}$

При сжигании топлива, имеющего азотосодержащие соединения, образуются топливные NO_x . Скорость образования топливных NO_x определяется скоростью реакций, известных из расширенного механизма Зельдовича Я.Б.



С увеличением температуры цикла от 2000 до 2500 К концентрация термических NO_x может увеличиться примерно в 50 раз [11,12]. При таком значительном влиянии температуры необходимо упомянуть о кинетически регулируемом механизме образования NO_x (рисунок 1.6). Согласно расширенному механизму образования термических NO_x в начале кинетически регулируемого процесса происходит образование NO_x с меньшей концентрацией (разность Δ_1), но затем в процессе догорания, при снижающейся температуре, процесс образования NO_x протекающий уже с

затухающими скоростями не сопровождается обратным процессом его разложения (разность Δ_2). Таким образом, происходит «замораживание» обратной реакции и «закалка» образовавшихся NO_x . Это объясняется тем, что в отличие от прямых реакций скорость разложения NO_x в обратных реакциях слабо зависит от температуры.

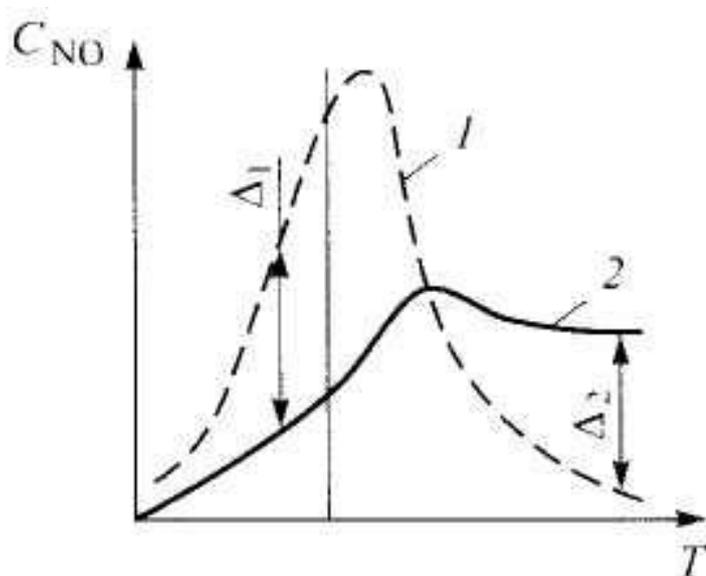


Рисунок 1.6– Изменение концентрации NO: 1- при равновесном процессе образования, 2- при образовании по кинетическому механизму

Некоторые работы отмечают [8], что процесс «закалки» NO_x лимитируется временным фактором, который представляет собой отношение промежутка времени необходимого для резкого падения температуры и времени отведенное на изменение концентрации NO_x :

$$t = t_T / t_{\text{NO}} \quad (1.16)$$

В том случае, когда время изменения концентрации NO значительно превышает время резкого уменьшения температуры временной фактор стремится к нулю. На изменение концентрации NO в сторону разложения требуется большая «тепловая» инерция по сравнению с «тепловой» инерцией образования NO в продуктах сгорания, поэтому ничтожно малое количество времени значительно облегчает процесс «закалки».

Известно, что химическое равновесие быстрее достигается при более высоких температурах. На рисунке 1.7 дана оценка образованию и разложению NO_x в термическом реакторе для различных значений температуры [11]. Видно, что при величине температуры $T = 2400 \text{ K}$ химическое равновесие достигается за время порядка 20 мс, а при $T = 2800 \text{ K}$ временной промежуток составляет около 3 мс. В поршневых ДВС температура фронта пламени кратковременно может достигать величины порядка $T = 2800 \text{ K}$. Необходимо отметить, что вследствие перемешивания прореагировавшей смеси и свежего заряда температура довольно быстро снижается, а имеющийся в распоряжении малый временной интервал для достижения химического равновесия недостаточен. Поэтому образование NO_x в процессе сгорания в поршневых ДВС предлагается рассматривать на основе детального кинетического механизма. Для этого в некоторых работах определяют локальные нестационарные температуры рабочего заряда используя многозонную модель [8,11].

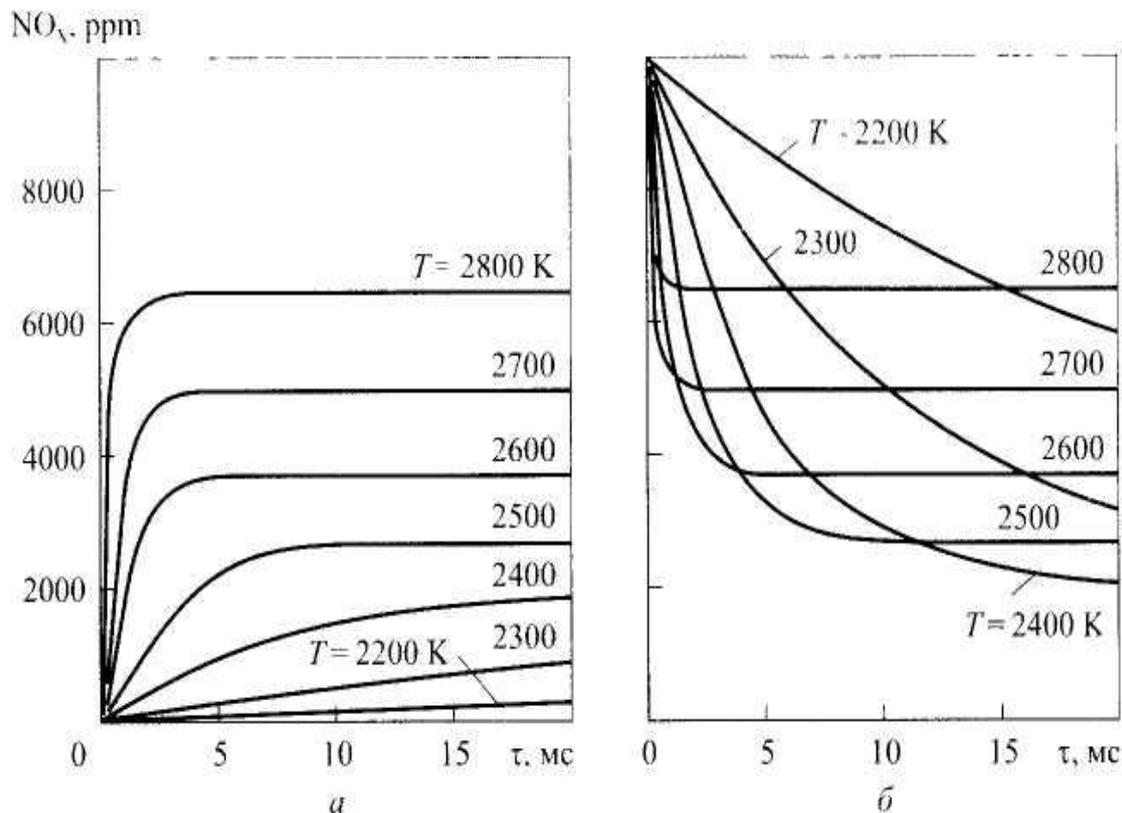


Рисунок 1.7 – Образование (а) и разложение (б) NO в термическом реакторе ($p = 60 \text{ бар}$, $\alpha = 1$)

В современной литературе нашли отражения ряд схем образования NO_x основанных на детальном кинетических механизмах (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Некоторые схемы образования NO_x в поршневых ДВС

Реакции	Автор, источник
$\text{OH} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	Чесноков С.А.
$\text{OH} + \text{OH} \leftrightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	
$\text{OH} + \text{H} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	
$\text{H} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{HO}_2$	
$\text{OH} + \text{OH} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	
$\text{CO} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$	
$\text{N} + \text{NO} \leftrightarrow \text{N}_2 + \text{O}$	
$\text{N} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$	
$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}$	
$\text{N} + \text{OH} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}$	
$\text{H} + \text{CO} \leftrightarrow \text{HCO}$	
$\text{OH} + \text{HCO} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	
$\text{H} + \text{HCO} \leftrightarrow \text{H} + \text{CO}$	
$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}$	
$\text{O} + \text{N} \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$	
$\text{OH} + \text{N} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}$	
$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}$	
$\text{NO} + \text{M} \leftrightarrow \text{N} + \text{O} + \text{M}$	
$\text{N}_2\text{O} + \text{M} \leftrightarrow \text{N}_2 + \text{O} + \text{M}$	
$\text{NO} + \text{NO} \leftrightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{O}$	
$\text{NO} + \text{O} + \text{M} \leftrightarrow \text{NO}_2 + \text{M}$	
$\text{NO}_2 + \text{O} \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}_2$	Лушпа А.И.
$\text{O} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{N} + \text{NO}$	
$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{N} + \text{NO}_2$	
$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}$	
$2\text{NO} \leftrightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$	
$\text{NO} + \text{O} \leftrightarrow \text{N} + \text{O}_2$	
$\text{O} + \text{N} + \text{M} \leftrightarrow \text{NO} + \text{M}$	
$\text{NO}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{O} + \text{NO} + \text{M}$	
$\text{NO}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{O}_2 + \text{N} + \text{M}$	
$\text{NO} + \text{O}_3 \leftrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}$	

Из таблицы видно, что во всех анализируемых схемах присутствуют реакции как классического, так и расширенного механизмов Зельдовича Я.Б.В. В работах Чеснокова С.А. и др. [8,15,16] рассматривается задача тепломассообмена и химической кинетики реакции догорания в зоне прореагировавшей смеси. Автор определяет поля температур и диффузии, что позволяет найти локальные зоны в камере сгорания, где происходит интенсивное реагирование рабочего заряда, и где заряд вступает в реакцию заметно слабее. При этом широко используется СКИН - модель (струйно-кинетическая) горения. Основу упомянутой модели заложена схема Басевича В.Я. в которой количество промежуточных реакций составляют значительную часть. Некоторые исследователи [16,8] отмечают, что схема из представленных реакций являющейся по сути сокращенной схемой Басевича В.Я. и для рассмотрения реакций горения во фронте пламени непригодна.

Схема образования NO_x W. Kleinschmidt содержит в себе реакции расширенного механизма Зельдовича Я.Б. Автор применяет схему, где одновременно делается попытка расчёта концентрации оксида углерода CO и NO_x (рисунок 1.8). К указанным реакциям добавляется реакция распада молекулярного азота $\text{N}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{N} + \text{N} + \text{M}$. В таблице 1.2 приведены только реакции образования оксида азота (система «N-O реакций»).

Моделирование по предложенной модели Андерссоном концентрации оксида азота в продуктах сгорания производилось при постоянном давлении в 50 атмосфер, постоянном объеме при стехиометрическом составе смеси (рисунок 1.9).

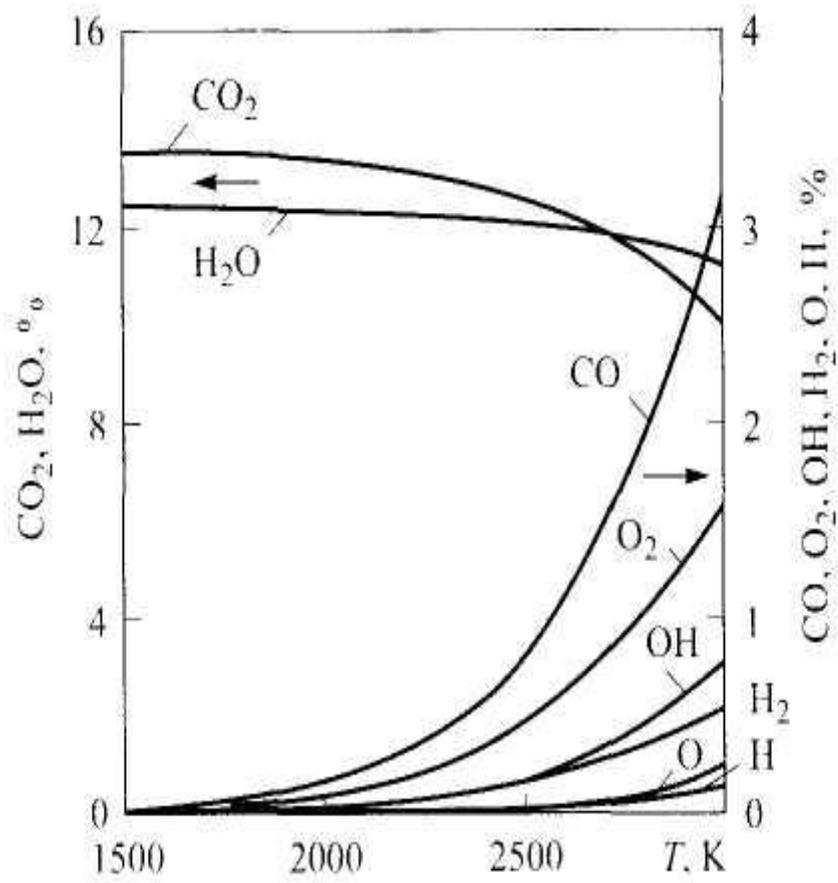


Рисунок 1.8 – Концентрация компонентов системы «О-Н-С реакций» при равновесном процессе

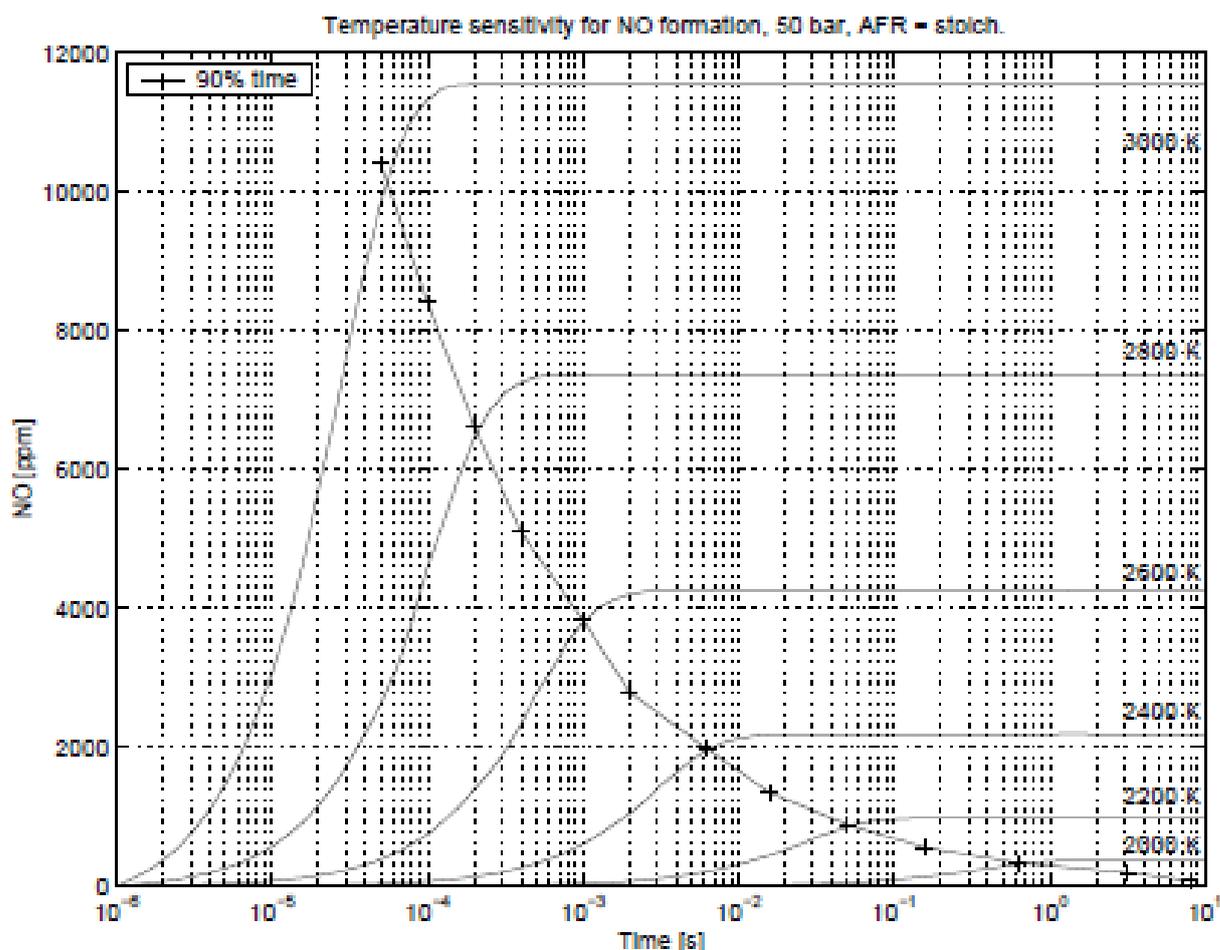


Рисунок 1.9 – График зависимости концентрации оксида азота в продуктах сгорания при постоянном давлении в 50 атмосфер, постоянном объеме при стехиометрическом составе смеси

1.8 Выводы по Главе 1

В первой главе диссертации обозначены основные компоненты ОГ ДВС, в частности, высоко опасные окислы азота, их негативное влияние на организм человека и окружающую среду. Рассмотрены стандарты, регламентирующие ограничение выбросов токсичных компонентов ОГ из автомобиля, и принципы проведения испытаний для определения уровня эмиссии основных компонентов ОГ. Показано развитие европейского регламентирующего стандарта, с постепенно ужесточаемыми требованиями к очистке отработавших газов, не только во время проверки по ездовому циклу при проведении сертификации систем нейтрализации ОГ, но и во

время автоматической диагностики OBD/EOBD состояния системы ЭСУД и СНОГ с помощью программного обеспечения электронного блока управления.

Рассмотрено влияние конструктивных особенностей двигателей, химического состава топлива, изменения регулировочных характеристик двигателей на образование токсичных компонентов ОГ и, в частности, окислов азота. Проанализированы основные способы снижения токсичности ОГ ДВС: нейтрализаторы ОГ, рециркуляция отработавших газов и применение альтернативных топлив. По результатам анализа сделано заключение, что внедрение системы рециркуляции ОГ требует значительных конструктивных изменений ДВС, приводит к увеличению расхода топлива из-за высокой удельной теплоемкости остаточных газов, а также к увеличению выбросов несгоревших углеводородов НС при степени рециркуляции выше 15%, что приводит к ухудшению перемешивания смеси и неустойчивому сгоранию разбавленной ТВС. Использование в СНОГ нейтрализаторов ОГ требует внедрения в конструкцию двигателя дополнительных изделий, а также проведения значительных калибровочных работ для отработки правильной работы функций токсичности в программном обеспечении контроллера. Поэтому логично устанавливать на автомобили каталитические нейтрализаторы с низкой загрузкой драгоценными и редкоземельными металлами с одновременным использованием других мероприятий, позволяющих снизить эмиссию вредных веществ. В качестве подобного мероприятия может быть использовано применение альтернативного топлива, например, сжатого природного газа. Эксперименты в работе проводились при использовании сжатого природного газа на исследовательских установках. Добавление в состав основного топлива активатора горения позволяет интенсифицировать процесс сгорания, увеличить скорость распространения пламени и сократить продолжительность сгорания. В качестве активатора горения в работе была рассмотрена добавка водорода до 15% по массе к основному топливу. Было

установлено, что добавление малых долей водорода с определенным шагом в основное альтернативное топливо позволяет проводить исследования процесса сгорания, поскольку при добавке водорода происходит изменение характеристик распространения пламени и интенсификация процесса сгорания. Также перевод двигателя на сжатый природный газ с добавлением в его состав долей водорода позволяет обеспечивать устойчивый процесс сгорания на бедных ТВС при возросшей скорости распространения пламени, что позволяет, при правильной организации регулировочных параметров, обеспечить снижение вредных веществ и, в частности, окислов азота, в ОГ ДВС.

В работе также рассмотрены механизмы образования NO_x в ОГ ДВС, в числе которых выделяют термический механизм образования и образование по механизмам быстрых и топливных окислов азота, а также из закиси азота.

Рассмотренные способы снижения концентрации окислов азота свидетельствуют об актуальности применения сжатого природного газа с добавлением в его состав долей водорода в качестве топлива для ДВС. Представленные модели оценки уровня содержания NO_x в ОГ ДВС не могут адекватно описывать концентрацию окислов азота в ОГ ДВС, конструкция и принцип которых отличается от ДВС, для которых были созданы модели, что свидетельствует об актуальности создания новой модели оценки эмиссии NO_x .

ГЛАВА 2 Описание оборудования, использованного в эксперименте и методики обработки экспериментальных данных

В этой главе будет объяснен выбор экспериментальной установки УИТ-85, оборудованной системой подачи сжатого природного газа и водорода в ТВС, подходящей для исследования процесса сгорания в связи с высокой гомогенностью смеси и низкой межцикловой нестабильностью на стационарном режиме работы и постоянными условиями на впуске. Для исследования условий образования и содержания NO_x в ОГ реальных ДВС часть экспериментов была проведена на исследовательской установке ВАЗ-2111, оборудованной, также, как и УИТ-85, системой подачи сжатого природного газа и водорода в ТВС. Была приведена методика снятия экспериментов на экспериментальных установках при добавлении долей водорода в ТВС. Описаны штатные и исследовательские сигналы, снимаемые во время эксперимента, а также датчики, применяемые на установках. Указана методика обработки экспериментальных данных и условия отсеивания аномальных сигналов. А также описан характер протекания рабочего процесса при работе на установке ВАЗ-2111, когда при обеднении ТВС из-за недостатка топлива не происходило воспламенения смеси в КС. Приведена методика проведения оценки погрешности измерений, в ходе которой выявлено, что после обработки полученных данных, погрешность находится в допустимых для исследования пределах.

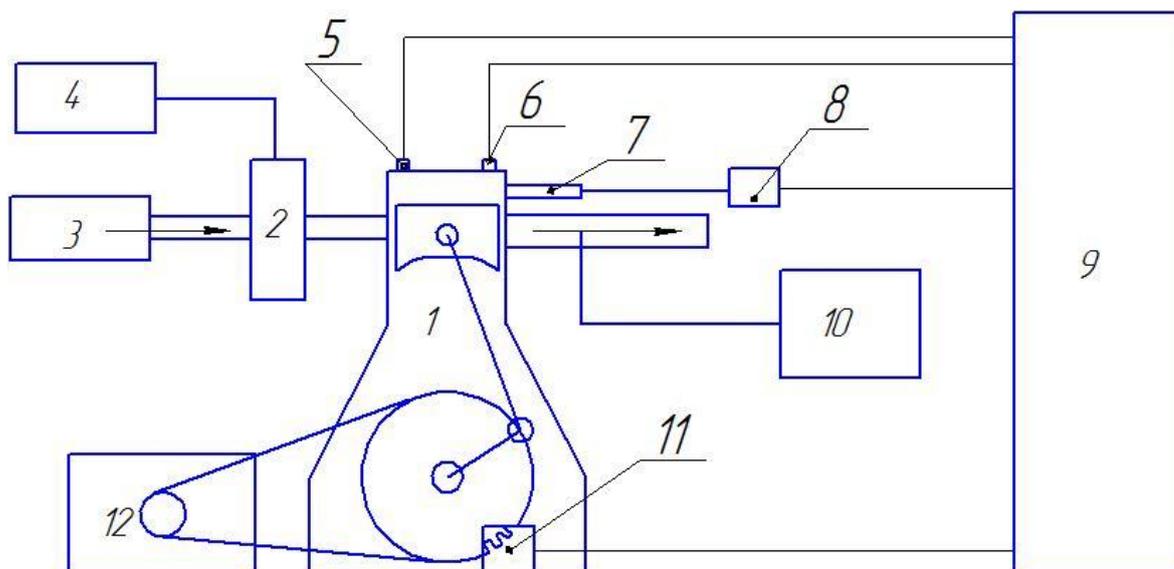
2.1 Описание экспериментальной установки УИТ-85

УИТ-85 – одноцилиндровая установка, предназначенная для измерения антидетонационной стойкости топлив, применяемых в ДВС, по исследовательскому и моторному методам, показана на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Общий вид УИТ-85

На рисунке 2.2 представлено схематическое изображение экспериментальной установки для исследования процесса сгорания на базе УИТ-85.



(1) УИТ-85; (2) карбюратор; (3) система, измерения расхода воздуха; (4) система топливоподачи с датчики расхода топлива; (5) датчик давления; (6) ионизационные датчики, (7) ионизационные датчики объединенного со свечой зажигания; (8) система фиксации искрового разряда; (9) система сбора данных; (10) газоанализатор; (11) датчик положения коленчатого вала; (12) привод коленчатого вала от асинхронного электромотора.

Рисунок 2.2 – Схема доработанной экспериментальной установки

2.2 Экспериментальная установка ВАЗ-2111

Помимо стендовых экспериментальных работ на одноцилиндровой установке, по выявлению возможностей снижения токсичности по оксидам азота в отработавших газах, были проведены экспериментальные работы на двигателе ВАЗ-2111 на режиме холостого хода, как наиболее востребованного в случае применения добавок водорода в природный газ, общий вид установки приведен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Общий вид экспериментального стенда с двигателем ВАЗ-2111

Экспериментального стенда с двигателем ВАЗ-2111 оснащен системой распределенного впрыска газового топлива и дополнительной системой

подачи водорода в ТВС, позволяющей подавать заданные доли водорода по отношению к массе природного газа. Общий вид системы показан на рисунке 2.4.

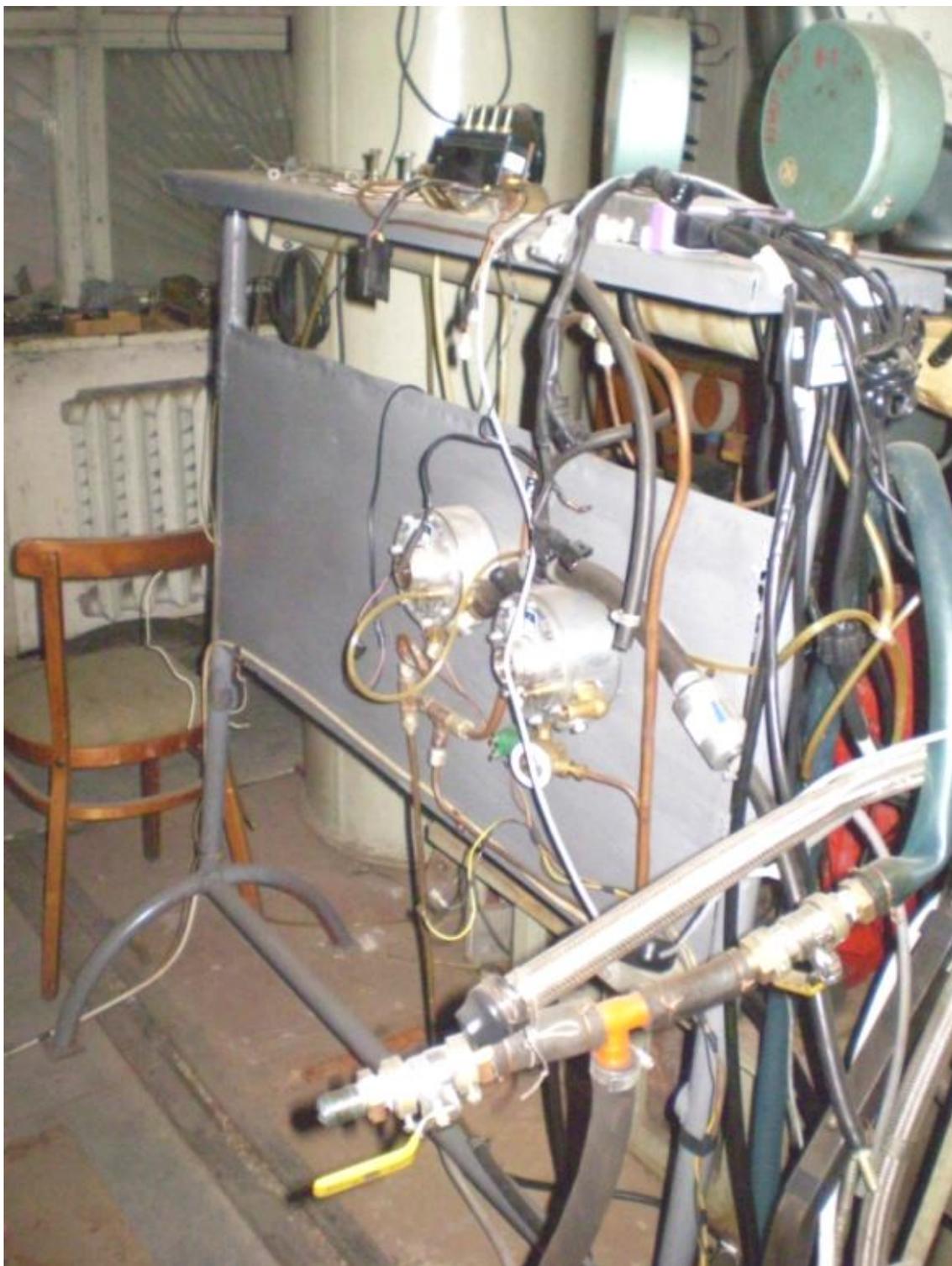


Рисунок 2.4 – Общий вид системы подачи H_2 в ТВС

составу смеси при различных добавках водорода в ТВС на двух скоростных стационарных режимах.

Варьируемыми факторами при проведении эксперимента на УИТ-85 были: частота вращения коленчатого вала n в двух вариантах 600 и 900 мин^{-1} ; добавка водорода ΔH в ТВС до 15%; коэффициент избытка воздуха α от 0,8 до 1,4.

При работе на ВАЗ-2111 добавка водорода осуществлялась в двух различных вариантах 0,2 и 0,3 кг/ч. Коэффициент избытка воздуха изменялся в пределах $\alpha=0,8...2,3$. Эксперименты проводились на стационарном скоростном режиме с частотой вращения коленчатого вала $n=880 \text{ мин}^{-1}$. УОЗ без добавки водорода соответствовал 38 градусам ПКВ до ВМТ, с добавкой водорода – 30 градусам.

Анализ случайной составляющей погрешности измерений, в связи со стохастичностью процесса сгорания, проводился по методике Стьюдента [21,45], с доверительной вероятностью 0,95. Результаты оценки погрешности прямых измерений процесса сгорания в двигателе ВАЗ-2111 и УИТ-85 приведены в таблицах 2.1-2.2.

Таблица 2.1 - Оценка случайной погрешности прямых измерений для УИТ-85

α	$H_2, \%$	$n, \text{мин}^{-1}$	УОЗ	$P_z, \text{МПа}$	$\delta P_z, \%$
1,134	0	900	19	1,2875	1,344
1,259	0	900	19	1,0707	1,057
1,123	0	900	19	1,31	1,5
1,051	0	900	19	1,4329	12,422
0,976	0	900	19	1,4705	2,43
0,981	0	900	19	1,4824	3,351
0,934	0	900	19	1,37	7,125
0,715	0	900	19	1,0334	5,802
1,04	0	600	0	1,25	3,385
1,06	0	600	11	1,75	2,245
1,04	0	600	13	1,81	1,671
1,04	0	600	19	2,08	0,545
1,04	0	600	21	2,22	0,678
1,04	0	600	24	2,41	0,351
1,03	0	600	27	2,5	0,414

1,04	0	600	30	2,65	0,265
1,04	0	600	33	2,74	0,232
1,147	0	600	13	1,761	4,111
1,062	0	600	13	1,833	1,854
1,251	0	600	13	1,748	1,942
1,048	0	600	13	1,871	0,52
1,051	0	600	13	1,898	1,507
1,007	0	600	13	1,878	1,152
0,932	0	600	13	1,7	1,856
0,82	0	600	13	1,38	9,488
0,929	0	600	13	1,837	1,481
1,412	0	900	21	0,92	5,189
1,345	0	900	21	1,12	0,937
1,281	0	900	21	1,16	1,934
1,221	0	900	21	1,24	0,702
1,235	0	900	21	1,1	1,416
0,973	0	900	21	1,45	0,569
0,927	0	900	21	1,31	0,622
0,881	0	900	21	1,14	0,72
0,842	0	900	21	1,05	0,821
0,744	0	900	21	0,71	1,327
0,726	0	900	21	0,66	1,173
0,712	0	900	21	0,64	0,83
1,085	18,9794	600	13	2,39	0,272
0,693	18,3502	600	13	1,925	0,541
1,089	22,6763	600	13	2,495	0,258
1,046	16,3315	600	13	2,305	0,456
0,948	17,9884	600	13	2,43	0,303
0,831	20,0612	600	13	2,39	0,464
1,11	13,7481	600	13	2,27	0,562
0,901	13,9408	600	13	2,38	0,925
1,078	9,00854	600	13	2,25	0,517
0,832	14,4811	600	13	2,2	0,923
0,994	11,8831	600	13	2,28	0,942
1,048	4,46293	600	13	2,075	0,554
0,917	8,90384	600	13	2,17	0,768
1,049	7,35213	600	13	2,145	0,798
0,926	2,96829	600	13	2,01	0,648
1,018	4,70406	600	13	2,07	2,768
1,075	3,13887	600	13	2,025	2,812
1,012	0	600	13	1,85	1,077
0,841	4,35613	600	13	1,865	0,754
0,711	10,8674	600	13	1,46	0,733
0,782	9,23773	600	13	1,93	0,616

0,733	13,7508	600	13	1,62	0,634
0,748	4,78109	600	13	1,31	6,715
0,874	0	600	13	1,848	1,404
0,733	0,72383	600	13	1,05	3,013
0,832	0	600	13	1,667	2,323
0,933	0	600	13	2	1,097
1,843	30,8446	600	13	2,1	2,63
1,812	27,5564	600	13	1,948	1,247
2,682	60,109	600	13	1,737	2,325
1,773	24,5363	600	13	1,984	3,202
1,706	23,1534	600	13	2,133	0,797
1,266	0	600	13	2,177	1,077
1,506	19,0842	600	13	2,183	1,332
1,561	21,2966	600	13	2,257	0,41
1,4461	21,312	600	13	2,287	0,321
1,5681	15,3943	600	13	1,991	1,955
1,6631	11,8789	600	13	1,77	6,035
1,5041	14,4411	600	13	2,17	0,32
1,4361	15,6671	600	13	2,248	0,643
1,2461	21,6268	600	13	2,493	0,28
1,502	9,47273	600	13	1,903	7,437
1,457	10,6929	600	13	2,019	5,151
1,306	11,8806	600	13	2,175	0,476
1,238	15,2615	600	13	2,363	0,534
1,395	7,45394	600	13	2,108	0,507
1,309	4,62705	600	13	2,048	0,609
1,337	5,73594	600	13	2,107	1,064
1,264	4,83271	600	13	2,145	0,411
1,248	5,46529	600	13	2,181	1,758
1,259	5,20825	600	13	2,14	0,407
1,261	5,36621	600	13	2,165	0,421
1,273	10,918	600	13	2,25	0,314
1,123	9,38448	600	13	2,257	0,523
1,217	10,0593	600	13	2,164	0,676
1,174	0	600	13	1,955	1,203
1,273	0	600	13	1,935	3,374
1,212	0	600	13	2,005	0,481
1,168	0	600	13	1,965	0,746
1,168	0	600	13	1,926	0,641
1,101	0	600	13	1,889	0,72
1,539	15,0343	900	13	1,527	0,47
1,422	15,0488	900	13	1,705	0,452
1,338	14,9723	900	13	1,858	0,336
1,462	9,98225	900	13	1,571	0,466

1,207	15,0145	900	13	2,12	4,176
1,354	10,0199	900	13	1,731	0,34
1,123	14,9932	900	13	2,044	0,245
1,226	10,039	900	13	1,899	0,356
1,396	5,07788	900	13	1,539	1,26
1,451	5,01146	900	13	1,47	2,018
1,136	10,0072	900	13	1,957	0,282
1,368	4,98868	900	13	1,638	0,788
1,197	8,88332	900	13	1,918	0,279
0,988	15,0237	900	13	2,15	2,649
0,821	5,02607	900	13	1,568	0,62
1,252	5,00795	900	13	1,764	0,466
1,366	0	900	13	1,269	3,301
1,001	9,98909	900	13	2,048	0,243
1,11	5,05255	900	13	2,201	7,276
1,317	0	900	13	1,339	0,713
0,928	10,3873	900	13	2,072	2,59
0,803	15,0095	900	13	1,887	4,058
1,264	0	900	13	1,428	0,694
1,016	4,99608	900	13	2,008	0,447
1,175	0	900	13	1,608	1,01
1,005	0	900	13	1,818	1,611
0,905	0	900	13	1,71	1,981
0,8403	0	900	13	1,472	1,156
0,769	0	900	13	1,012	1,173
0,867	9,9915	900	13	1,631	0,537

Таблица 2.2 - Оценка случайной погрешности прямых измерений для двигателя ВАЗ-2111:

α	$H_2, \%$	$n, \text{мин}^{-1}$	$УОЗ$	$P_z, \text{МПа}$	$\delta P_z, \%$
0,8	0	880	35	2,901	6,848
0,9	0	880	38	2,916	6,164
0,7	0	880	38	2,794	7,749
1	0	880	38	2,751	5,799
0,95	0	880	38	2,832	7,226
1,1	0	880	40	2,561	7,582
1,2	0	880	42	2,425	6,097
1,3	0	880	45	2,342	6,46
0,7	0	880	35	2,762	8,749
0,797	4,739	880	32	2,774	6,365
0,867	5,711	880	29	2,809	7,014
0,941	6,052	880	27	2,846	6,854
1,028	6,157	880	25	2,775	6,754

1,107	6,321	880	25	2,632	5,569
1,184	6,48	880	27	2,507	6,047
1,441	7,217	880	32	2,406	6,7
1,393	6,534	880	30	2,366	7,032
1,482	6,635	880	35	2,372	9,134
1,791	6,56	880	40	2,377	4,861
0,746	2,709	880	35	2,774	6,482
0,662	2,179	880	35	2,809	5,925
0,831	3,243	880	28	2,846	5,041
0,87	3,401	880	25	2,775	5,633
0,915	3,561	880	30	2,632	6,046
0,998	3,796	880	35	2,501	7,44
1,085	3,963	880	36	2,406	5,701
1,178	3,826	880	35	2,366	5,451
1,273	3,803	880	35	2,372	5,944
1,417	3,732	880	40	2,377	4,34
1,592	3,623	880	45	2,774	5,825

ГЛАВА 3 Результаты стендовых исследований по теме диссертационного исследования и их анализ

3.1 Результаты экспериментального исследования, проведенного на УИТ-85

Проводимые в последние годы мировыми автогигантами и исследовательскими лабораториями теоретические и экспериментальные исследования по определению возможности снижения токсичности отработавших газов в основном по оксидам азота требует создания современных интерактивных систем диагностики процесса сгорания. Для создания таких систем необходимо установить взаимосвязи между регулируемыми параметрами и показаниями датчика ионизации. Максимальное значение температуры в поршневых ДВС определяется скоростью распространения пламени в основной фазе. Увеличение этой скорости обеспечивает выделение большей части тепла в процессе, близком к изохорному. При этом достигаются большие значения максимальной температуры продуктов сгорания. Следовательно, изменение скорости распространения пламени должно обуславливаться и изменениями концентрации оксидов азота. Как показали исследования [1] между скоростью распространения и величиной ионного тока пламени существует однозначная зависимость. В связи с этим определение взаимосвязи между концентрацией оксидов азота, средней скоростью распространения пламени и величины ионного тока является актуальной задачей.

Для этого были проведены экспериментальные исследования на специальной установке УИТ-85, в результате чего, получены данные по токсичности отработавших газов газоанализатором МЕТА. Полученные результаты представлены на рисунке 3.1 в виде связи концентрации оксидов азота в отработавших газах с α , при различных добавках водорода. Полученные данные свидетельствуют о смещении максимума по

токсичности в зону бедных смесей при увеличении количества добавляемого водорода

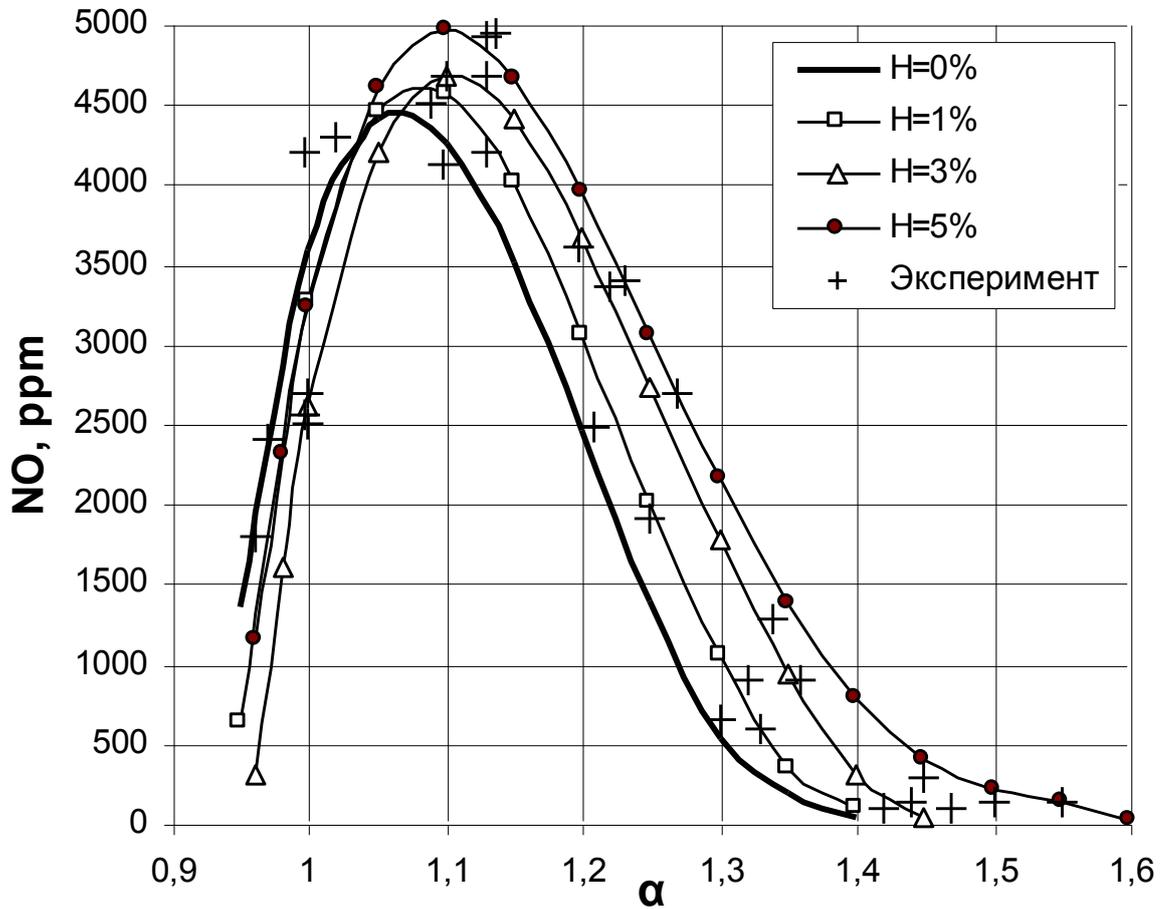


Рисунок 3.1 – Связь концентрации оксидов азота в отработавших газах с α , при различных добавках водорода.

Установленные в камеру сгорания УИТ-85 датчики ионизации позволили провести расчет средних скоростей распространения фронта пламени в камере сгорания, что проиллюстрировано на рисунке 3.2.

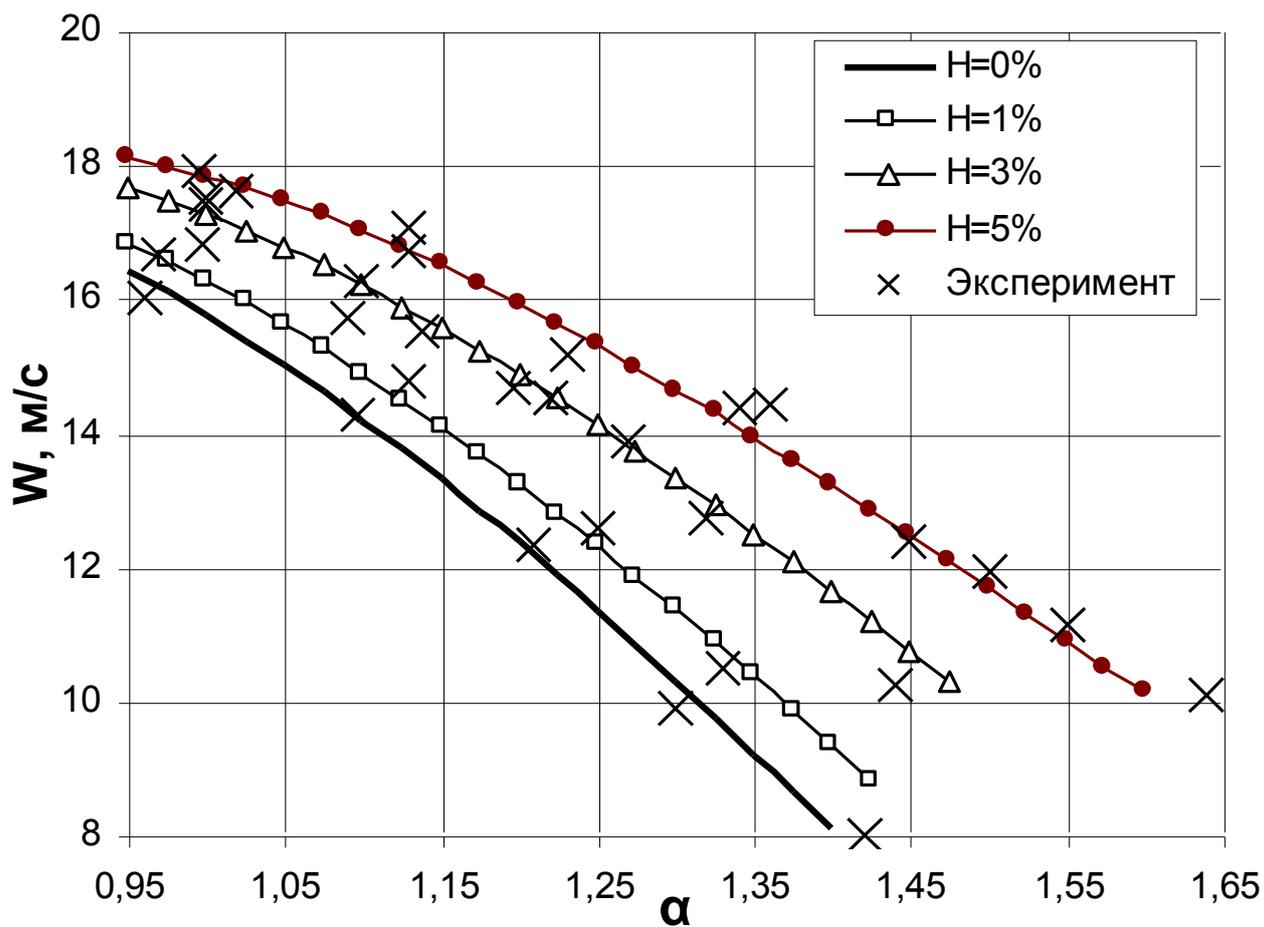


Рисунок 3.2 – Связь средней скорости распространения пламени с α , при различных добавках водорода.

Литературные источники показывали, что должна иметься корреляция между характеристикой распространения фронта пламени и токсичностью по оксидам азота. В нашем случае эта связь представлена на рисунке 3.3.

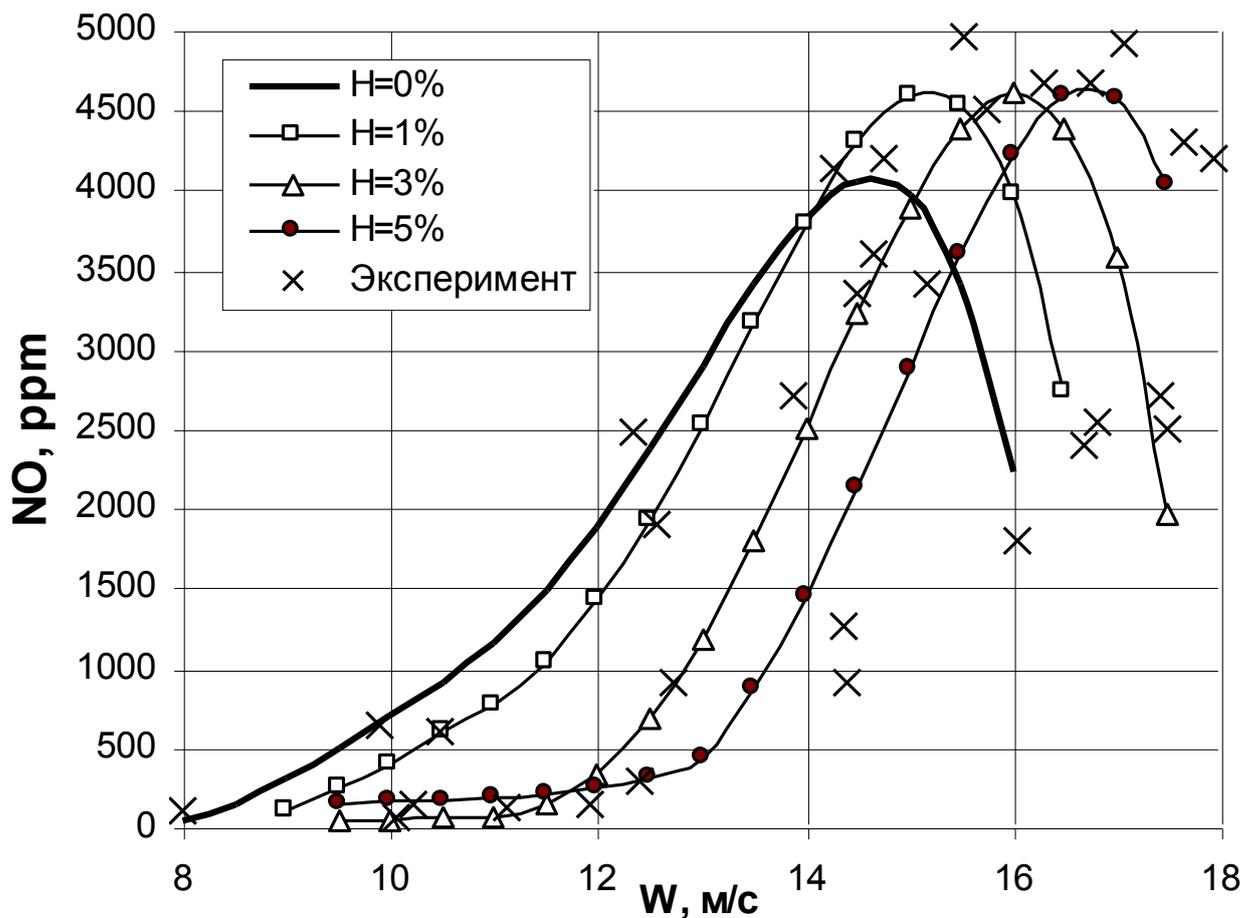


Рисунок 3.3 – Связь концентрации NO в ОГ со средней скоростью распространения пламени, при различных добавках водорода.

Проводимые исследования показали, что при увеличении средней скорости распространения пламени из-за добавления водорода, происходит повышение максимальной температуры цикла, это в первую очередь и приводит к увеличению выхода оксидов азота. Таким образом, увеличение средней скорости распространения пламени с добавлением водорода для смесей беднее $\alpha = 1,1$, приводит к увеличению выхода оксидов азота. Обобщая вышесказанное, построен график зависимости оксидов азота от максимальной температуры цикла, который показан на рисунке 3.4. Из графика видно, что при добавлении водорода максимум выхода оксидов азота смещается к более бедным смесям, так как с добавлением водорода прирост температуры становится более значимым, как это показано в [2]. Для

состава смеси близкому к стехиометрическому влияние добавки водорода на максимальную температуру незначительно менее 1%, поэтому именно здесь можно оценить изменение продолжительности сгорания на выход оксидов азота. Так на графике, рассматривая участок от $\alpha = 1$ до 1,1, разницу между выходом оксидов азота с добавлением водорода и без него можно отнести на счет повышения средней скорости распространения пламени.

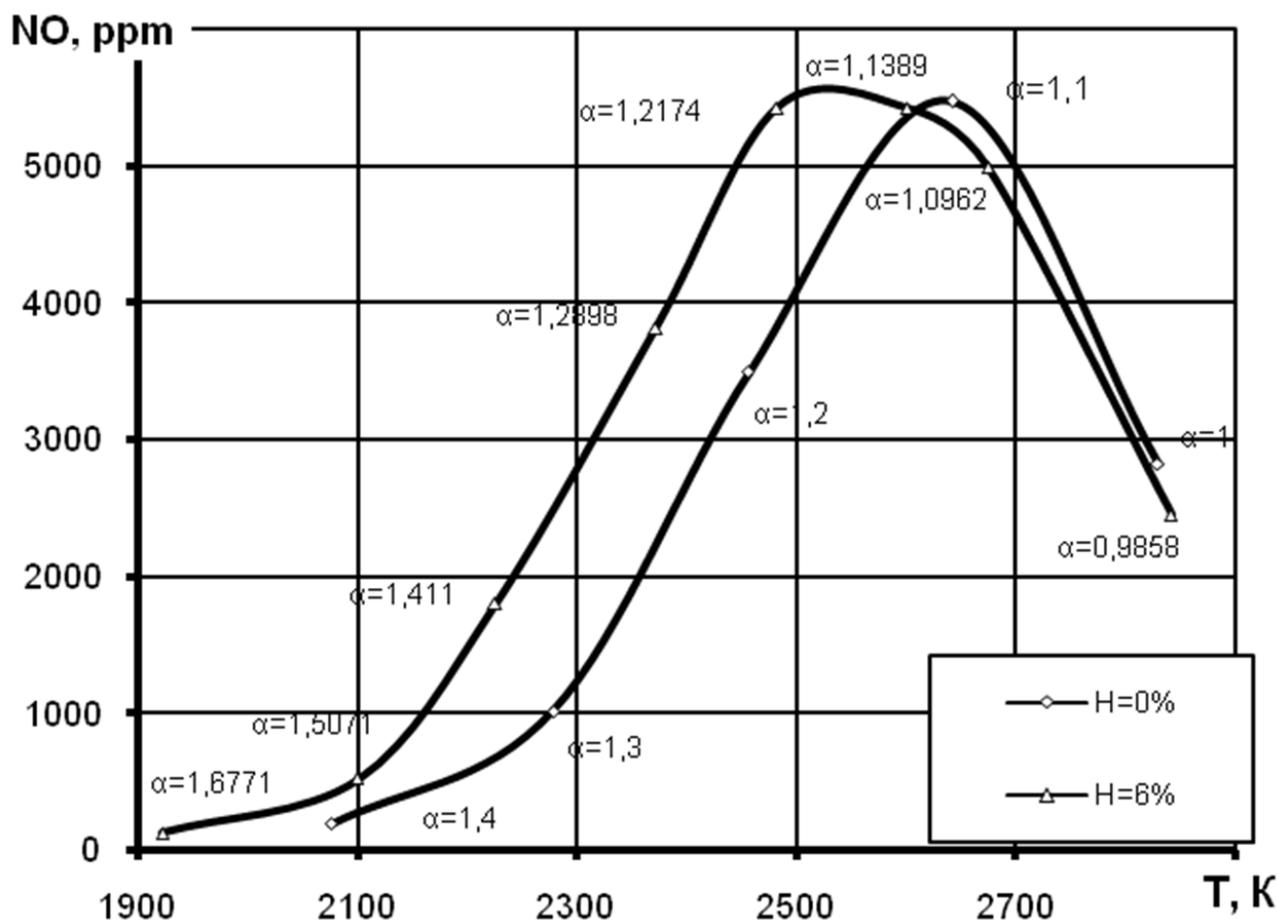


Рисунок 3.4 - График зависимости выхода NO от максимальной температуры цикла.

Проведённые исследования позволяют расширить понимание влияния добавления водорода в топливно-воздушную смесь на токсичность ДВС, конкретно на выход оксидов азота. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования процесса сгорания при разработке новых

способов организации рабочего процесса ДВС, в частности с использованием альтернативных топлив.

3.2 Влияние добавки водорода в сжатый природный газ на рабочий процесс и концентрацию оксидов азота в отработавших газах ДВС с искровым зажиганием

Представлен анализ экспериментальных данных. В ходе проведения исследований были получены индикаторные диаграммы по углу поворота коленчатого вала. На рисунке 3.5 представлены индикаторные диаграммы для УИТ-85 на режиме $n=900 \text{ мин}^{-1}$, $\theta=13$, $\varepsilon=7$ без добавки (рисунок 3.5) и с 15% добавкой водорода (рисунок 3.6).

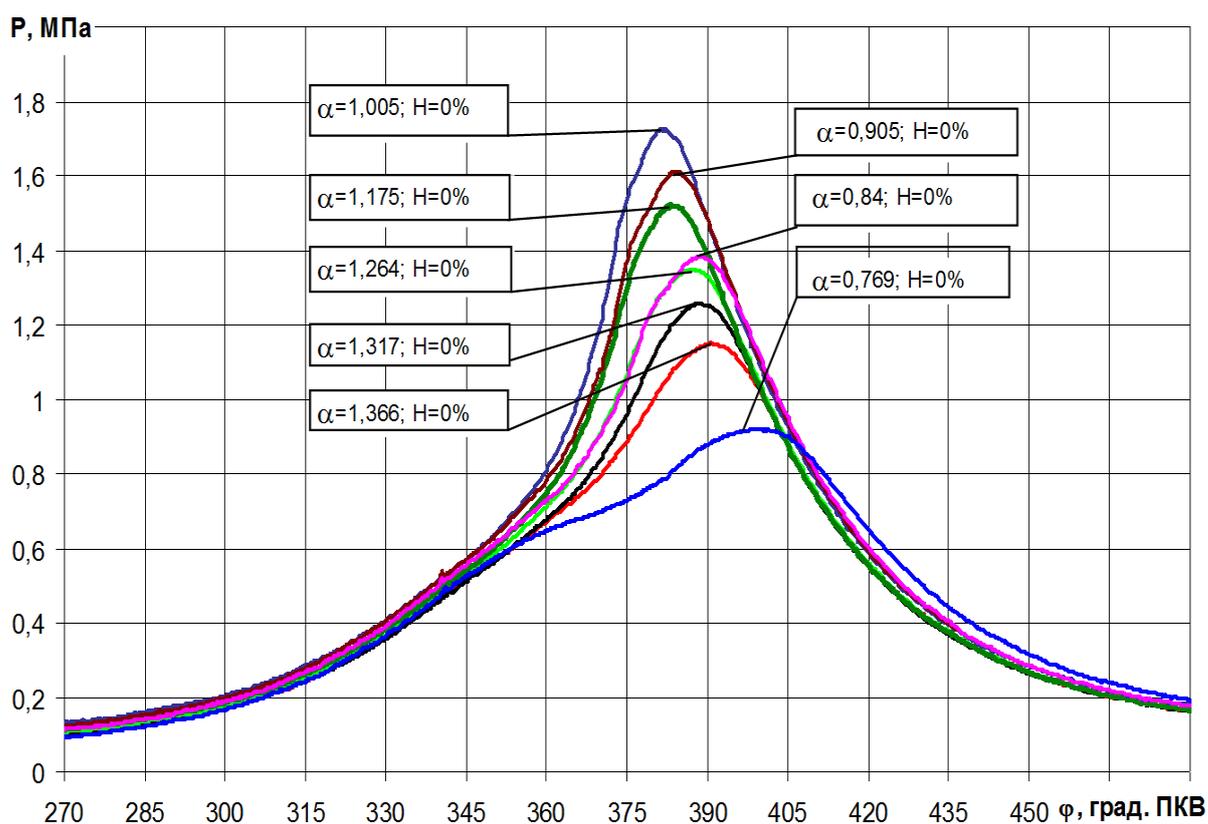


Рисунок 3.5 – Индикаторные диаграммы при работе на СПГ

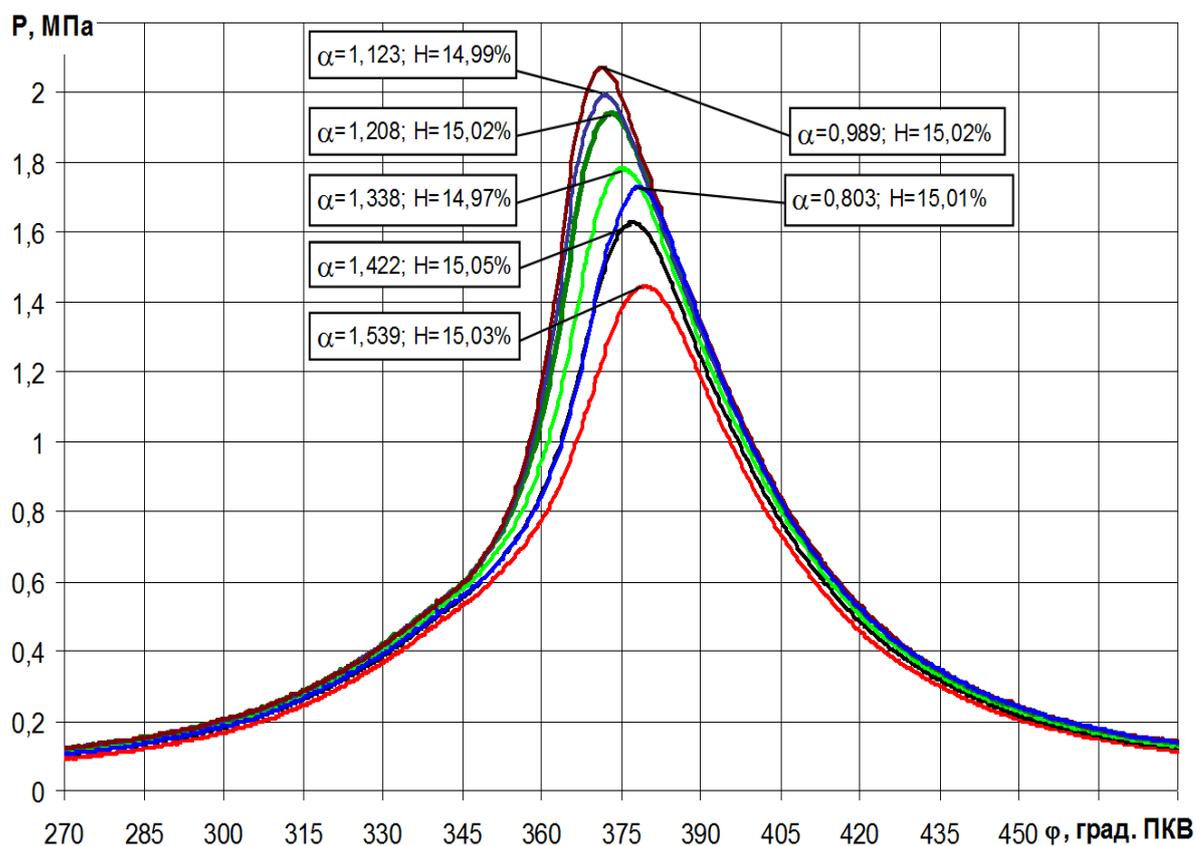


Рисунок 3.6 – Индикаторные диаграммы при работе на СПГ с добавкой водорода

Было обнаружено, что при увеличении добавки водорода в ТВС происходит: увеличение давления сгорания, жесткости работы установки, скорости нарастания давления, уменьшение продолжительности сгорания, достигается стабильная работа обедненных ТВС. Максимальное давление сгорания достигается при работе на стехиометрическом составе, при обеднении и обогащении смеси происходит снижение P_z [1].

На рисунках 3.7 и 3.8 представлены зависимости максимального давления как функции от коэффициента избытка воздуха $P_{zmax}=f(\alpha)$ для двух скоростных режимов УИТ-85 $n=600 \text{ мин}^{-1}$ (рисунок 3.7) и $n=900 \text{ мин}^{-1}$ (рисунок 3.8) и для ВАЗ-2111 (рисунок 3.9) на режиме $n_{xx}=880 \text{ мин}^{-1}$ и при двух различных УОЗ $\theta=38$ градусов ПКВ до ВМТ без добавки водорода и $\theta=30$ с добавкой водорода.

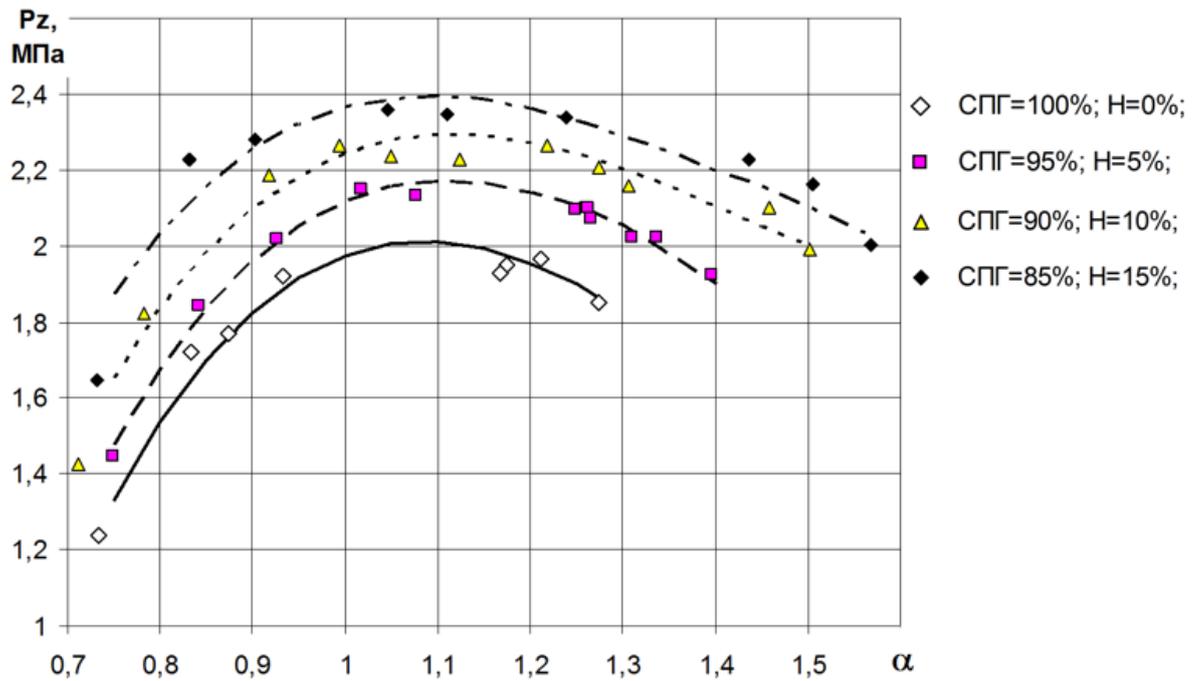


Рисунок 3.7 – Зависимость максимального давления от состава ТВС, для скоростного режима УИТ-85 $n = 600 \text{ мин}^{-1}$

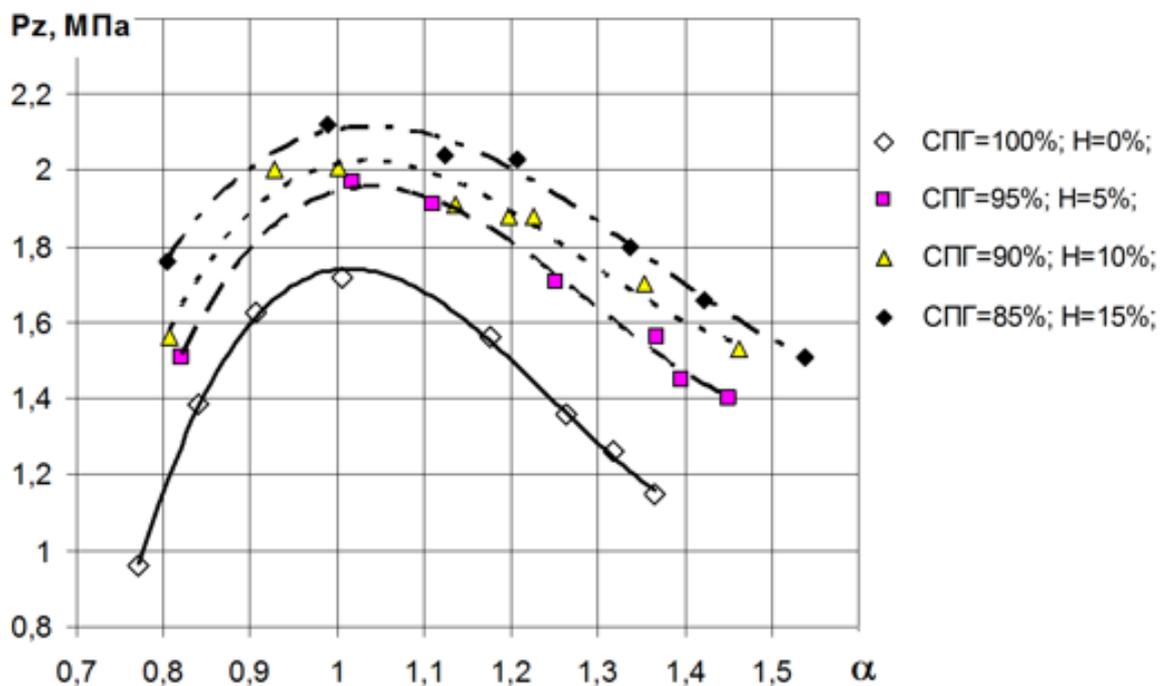


Рисунок 3.8 – Зависимость максимального давления от состава ТВС, для скоростного режима УИТ-85 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

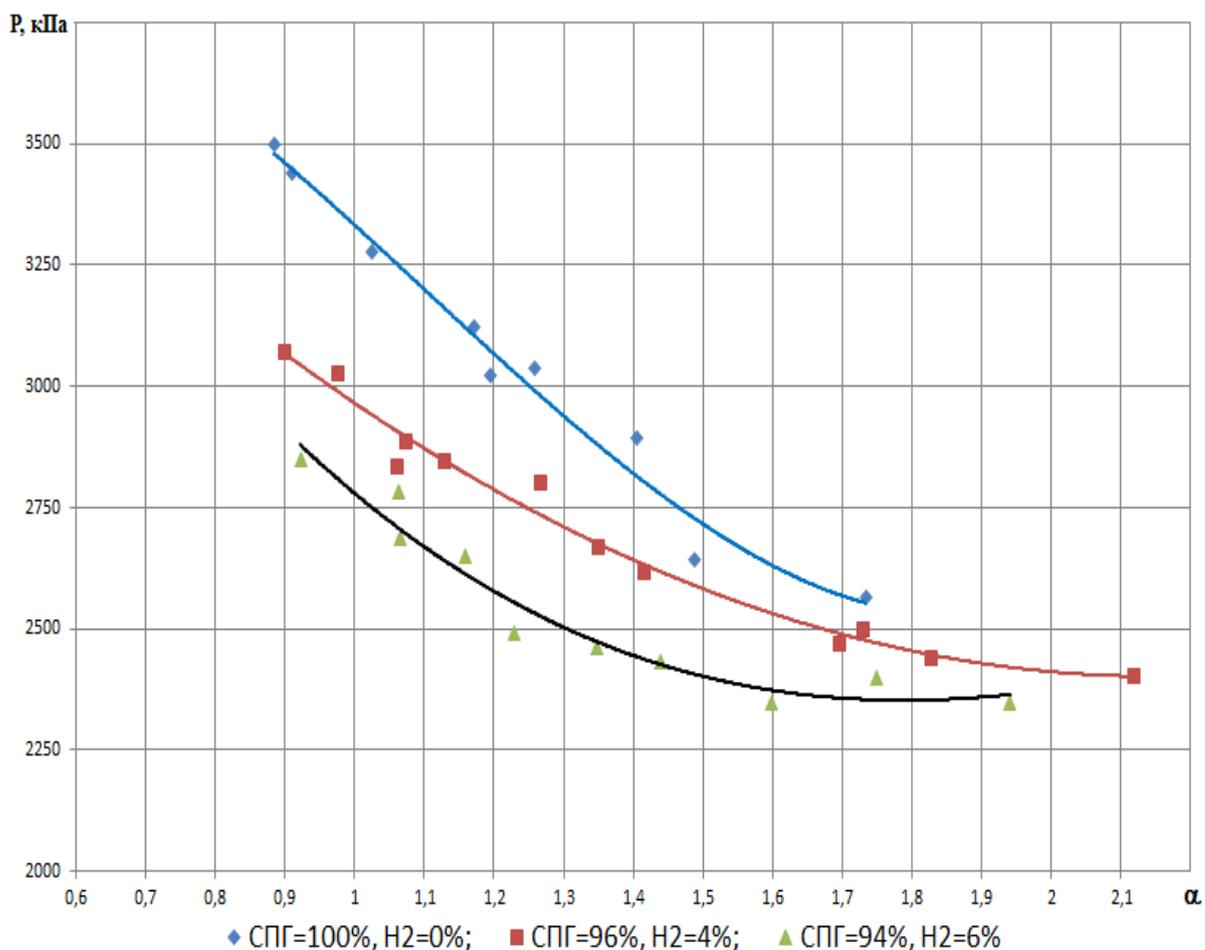


Рисунок 3.9 – Зависимость максимального давления от состава ТВС для ВАЗ-2111 (на режиме $n_{xx} = 880 \text{ мин}^{-1}$ и при двух различных УОЗ $\theta = 38$ градусов ПКВ до ВМТ без добавки водорода и $\theta = 30$ с добавкой водорода)

Установлено, что при работе для УИТ-85 на частоте вращения коленвала $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ максимальное давление сгорания в среднем на 0,25 МПа больше чем при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$, а также в первом случае достигается более стабильный процесс сгорания установки на бедных смесях при $\alpha > 1,1$, что объясняется наличием на более тихом режиме меньшего количества ОГ в цилиндре из-за более высокого значения P , т.к. при увеличении частоты вращения коленвала ухудшается очистка цилиндров и уменьшается коэффициент наполнения [1].

Анализ экспериментальных данных, проведенный в третьей главе, показал, что добавка активатора горения в ТВС существенно изменяет характеристики распространения пламени, интенсифицируя процесс

сгорания. Причем, для двух установок получились различные по характеру и величине зависимости, что объясняется различными условиями проведения экспериментов на УИТ-85 и ВАЗ-2111.

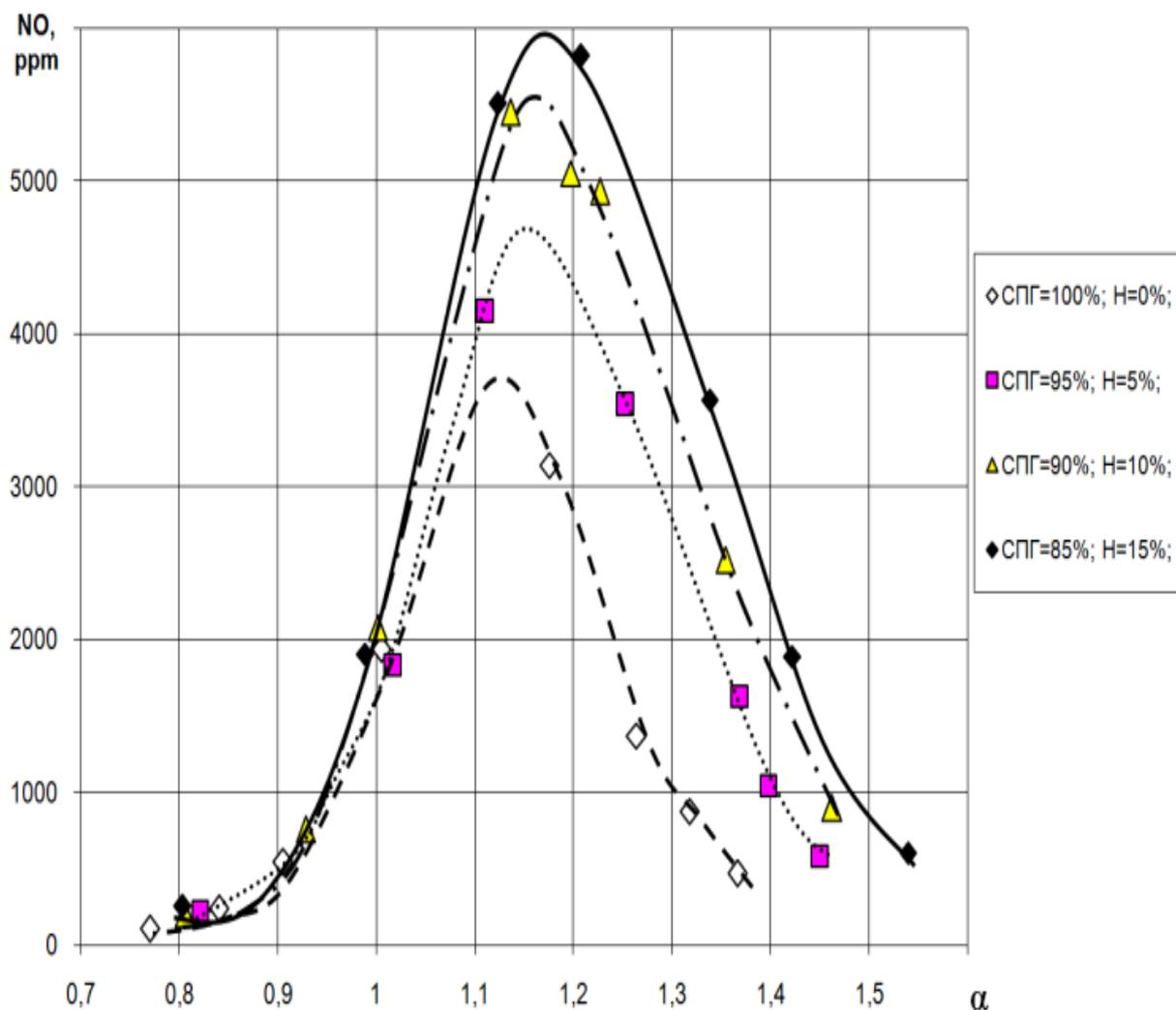


Рисунок 3.10 – Зависимость концентрации NO_x от состава ТВС

Экспериментальная оценка концентрации NO_x в отработавших газах от коэффициента избытка воздуха и доли водорода в топливе представлена на рисунках 3.10 и 3.11. Из этих рисунков мы видим насколько сильно различаются результаты, полученные на одноцилиндровой исследовательской установке и в условиях реального двигателя, сильно забалластированного отработавшими газами.

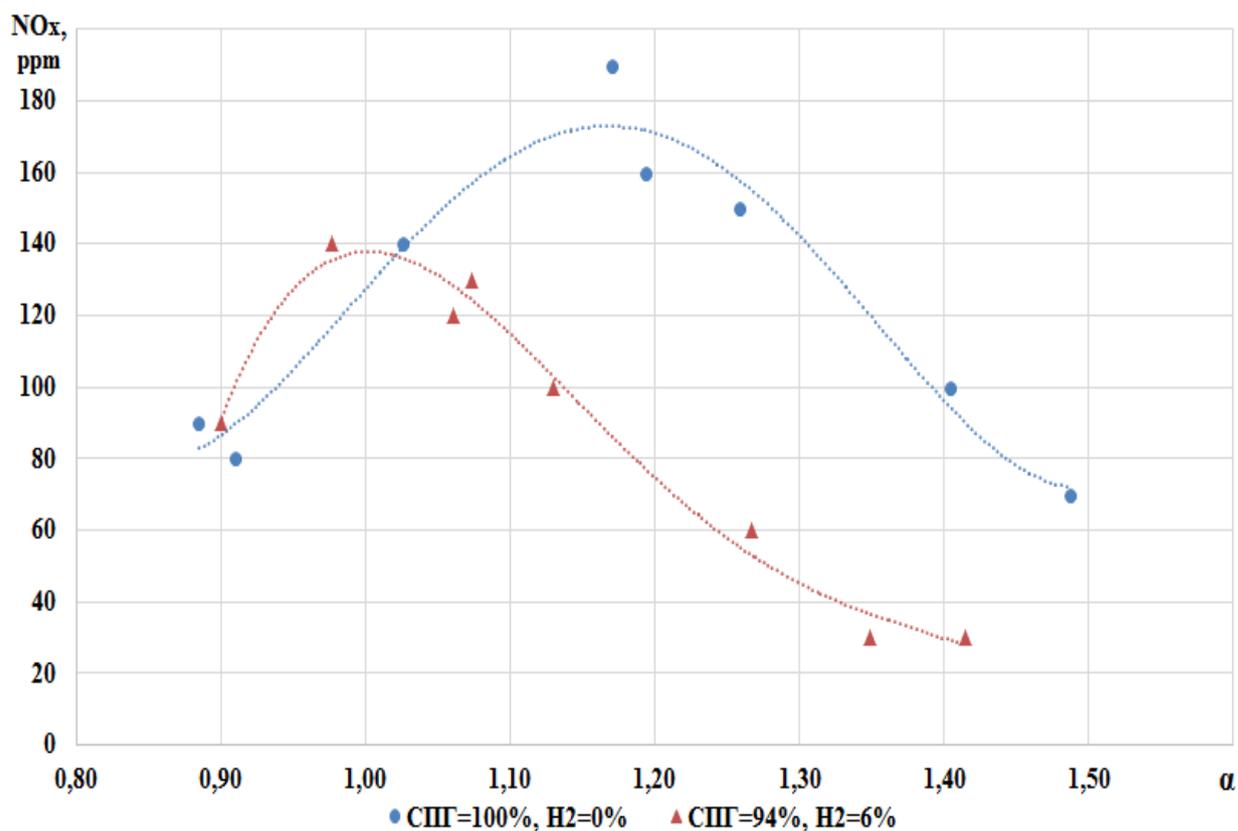


Рисунок 3.11 – Зависимость концентрации NO_x от состава ТВС

3.3 Выводы по главе 3

Проведенный анализ показал возможности снижения концентрации окислов азота NO_x в отработавших газах ДВС на газовом топливе, за счет возможности варьирования составом смеси и режимом дросселирования при сохранении энергетических показателей работы ДВС за счет добавки водорода.

Анализ экспериментальных данных выявил зависимости концентрации окислов азота NO_x в отработавших газах ДВС на газовом топливе с максимальной температурой в процессе сгорания, причем зависимости имеют линейный характер.

Глава 4 Оценка возможностей снижения оксидов азота в отработавших газах ПДВС воздействием промотирующей добавкой водорода на процесс сгорания

4.1 Расчет температуры газов в цилиндре ДВС

Оценка действительного термодинамического состояния рабочего тела в процессах сжатия, сгорания и расширения является важной задачей, особенно на режимах работы двигателя, связанных со значительным разбавлением горючей смеси остаточными газами, так называемыми режимами глубокого дросселирования [1, 2, 3, 4]. На данных режимах оценка изменения внутренней энергии рабочего тела в процессах сжатия, сгорания и расширения проводимая по формуле (4.1) затруднена в связи со сложностью точного определения массы остаточных газов, а, следовательно, и точной температуры рабочего тела из уравнения состояния (4.2).

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot C_v \cdot \Delta T, \quad (4.1)$$

где m – масса рабочего тела;

μ – молекулярная масса рабочего тела;

C_v – молярная теплоемкость при постоянном объеме;

ΔT – изменение температуры;

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T, \quad (4.2)$$

где p – текущее давление;

V – текущий объем;

T – текущая температура;

R – универсальная газовая постоянная.

Расчет температуры в процессе сгорания проводился по выражению, полученному из уравнения состояния (4.3):

$$T = \frac{V_{\varphi} \cdot P}{G_{см.цикл} \cdot Z_r \cdot (R_{св.см} \cdot (1 - \chi) + R_{пр.сг} \cdot \chi)}, \quad (4.3)$$

где V_{φ} – объем на участке 1-2;

P – давление на участке 1-2;

$G_{см.цикл}$ – расход суммарной смеси за цикл;

$Z_r = 1,15$ – суммарный коэффициент сжимаемости смеси;

$R_{св.см}$ – удельная газовая постоянная свежей ТВС;

$R_{пр.сг}$ – удельная газовая постоянная продуктов сгорания;

χ – доля активного тепловыделения.

Результаты расчета максимальной температуры в процессе сгорания и соответствующего ей концентрация оксидов азота в отработавших газах для одноцилиндровой установки УИТ-85 и двигателя ВАЗ-2111, работающего на режиме холостого хода представлены в таблице 4.1 и 4.2 соответственно.

Таблица 4.1 - Результаты расчета максимальной температуры в процессе сгорания соответствующего ей концентрация оксидов азота в отработавших газах для одноцилиндровой установки УИТ-85

УИТ-85	NO _x , мил ⁻¹	T _z , К
$\alpha < 0,98$	201	2748,4
	240	2824,1
	216	2858,8
	546	3011,1
	255	3026,5
	759	3116,8
$0,98 < \alpha < 1,05$	1940	3037,4
	2080	3096,3
	1840	3150,3
	1905	3245
$\alpha > 1,05$	469	2355,6
	605	2364,3
	107	2391,8
	590	2423,9
	880	2461,9
	900	2503,4
	1050	2516
	1370	2578,7
	1890	2584,9
	1635	2664,3
	2520	2699,7
	3140	2741,6
	3570	2778,3
	3540	2794,9
	4930	2906,2
	5050	2940,8
	5820	2952,2
	5450	3001,3
5505	3006,7	
3740	3010,9	

Таблица 4.2 - Результаты расчета максимальной температуры в процессе сгорания соответствующего ей концентрации оксидов азота в отработавших газах для одноцилиндровой установки УИТ-85

Коэффициент избытка воздуха	Массовая доля водорода в топливе, кг/ч	Массовая доля водорода в топливе, %	Максимальное давление в процессе сгорания, КПа	Концентрация оксидов азота в отработавших газах, мил ⁻¹	Максимальная температура в процессе сгорания, К
$\alpha < 0,98$	0,03	6,321432	2668	30	2428,9
	0,03	6,480041	2616	30	2625,7
	0	0	2736	35	2684
0,98 < α < 1,0 5	0	0	3617	90	3024,7
	0,03	4,027321	3072	90	2942,4
	0	0	3187	80	2830,6
	0,03	6,157029	2505	60	2232,4
	0	0	3019	100	3223,4
$\alpha > 1,05$	0,03	4,739516	3026	140	2383,2
	0	0	3333	140	2677,3
	0,03	5,448522	2836	120	2148,2
	0,03	5,711414	2617	130	2106,3
	0,03	6,052096	2736	100	2184,1
	0	0	3808	190	2745
	0	0	2773	160	2637,4
	0	0	3118	150	2758,7
	0	0	2138	70	1284,1
	0	0	2317	60	1639,2

Максимальные температуры наблюдаются в богатых областях вследствие высокого давления и в бедных областях вследствие увеличения открытия дроссельной заслонки, что ведет к улучшению наполнения цилиндров, вследствие чего происходит увеличение эффективности

продувки остаточных газов. Повышение наполнения цилиндра приводит к интенсификации процесса сгорания – температура газов в цилиндре возрастает. Об улучшении наполнения свидетельствуют давления компрессионного сжатия в циклах с пропусками воспламенения – на обедненных смесях ($P_c=2,2$ МПа) давление сжатия выше, чем на обогащенных ($P_c=1,5$ МПа).

4.2 Влияние температуры на образование оксидов азота в отработавших газах поршневых ДВС с искровым зажиганием

Представлены результаты экспериментов по анализу токсичности отработавших газов по оксидам азота в УИТ-85 и двигателе ВАЗ-2111 на режиме холостого хода. Проведенный анализ позволил выявить связь между концентрацией оксидов азота в отработавших газах и максимальной температурой цикла.

Рассмотрено влияние конструктивных особенностей двигателей, химического состава топлива, изменения регулировочных характеристик двигателей на образование токсичных компонентов отработавших газов (ОГ) и, в частности, окислов азота. Проанализированы основные способы снижения токсичности ОГ ДВС: нейтрализаторы ОГ, рециркуляция отработавших газов и применение альтернативных топлив. По результатам анализа сделано заключение, что внедрение системы рециркуляции ОГ требует значительных конструктивных изменений ДВС, приводит к увеличению расхода топлива из-за высокой удельной теплоемкости остаточных газов, а также к увеличению выбросов несгоревших углеводородов (НС) при степени рециркуляции выше 15%, что приводит к ухудшению перемешивания смеси и неустойчивому сгоранию разбавленной топливно-воздушной смеси (ТВС). Использование нейтрализаторов ОГ требует внедрения в конструкцию двигателя дополнительных изделий, а также проведения значительных калибровочных работ для отработки

правильной работы функций токсичности в программном обеспечении контроллера. Поэтому логично устанавливать на автомобили каталитические нейтрализаторы с низкой загрузкой драгоценными и редкоземельными металлами с одновременным использованием других мероприятий, позволяющих снизить эмиссию вредных веществ. В качестве подобного мероприятия может быть использовано применение альтернативного топлива, например, сжатого природного газа.

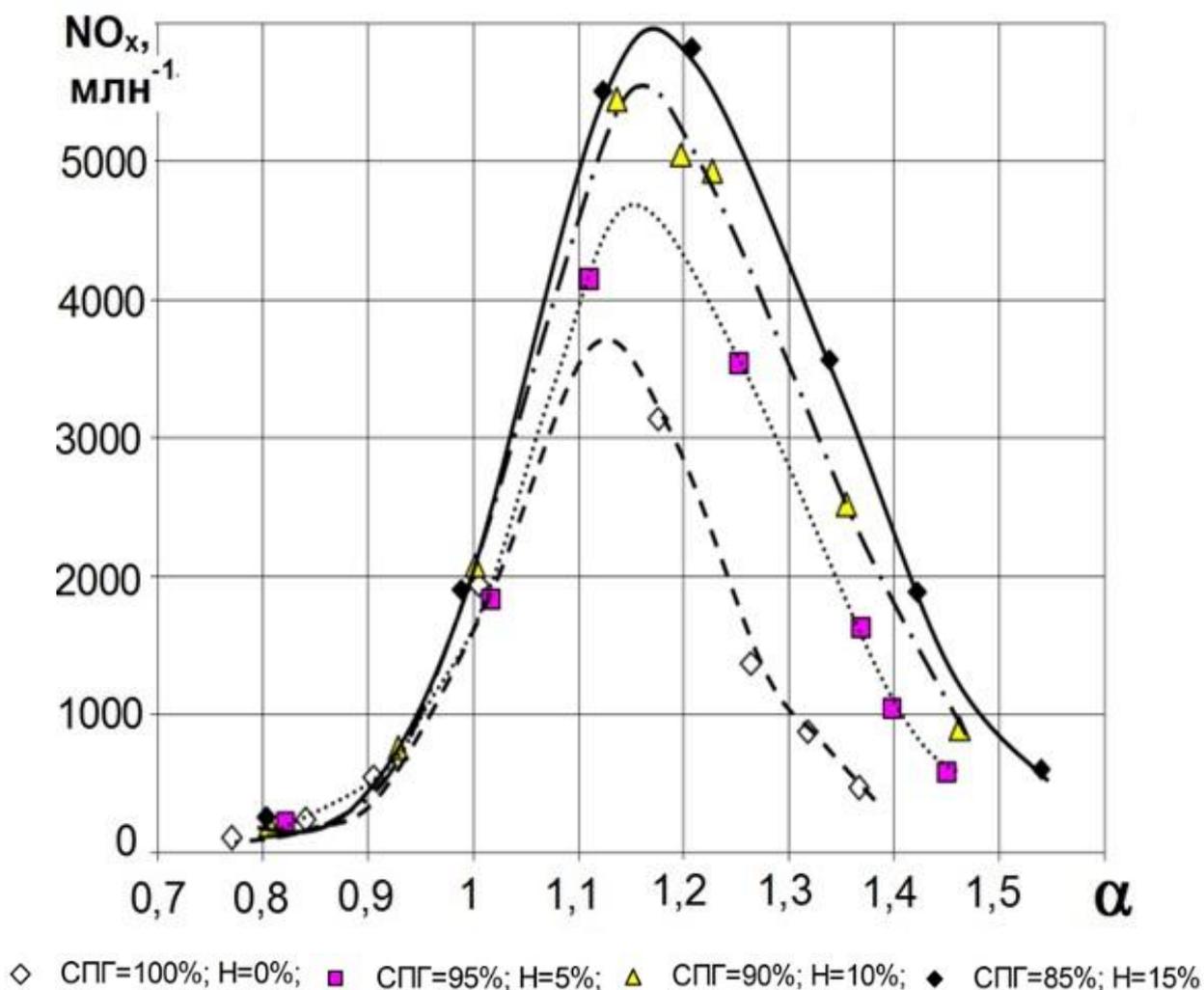


Рисунок 4.1 – Зависимость концентрации оксидов азота в отработавших газах УИТ-85 от состава ТВС

Анализ экспериментальных данных, показал, что добавка активатора горения в ТВС существенно изменяет характеристики распространения

пламени, интенсифицируя процесс сгорания. Причем, для двух установок получились различные по характеру и величине зависимости, что объясняется различными условиями проведения экспериментов на УИТ-85 (рисунок4.1) и ВАЗ-2111 (рисунок4.2).

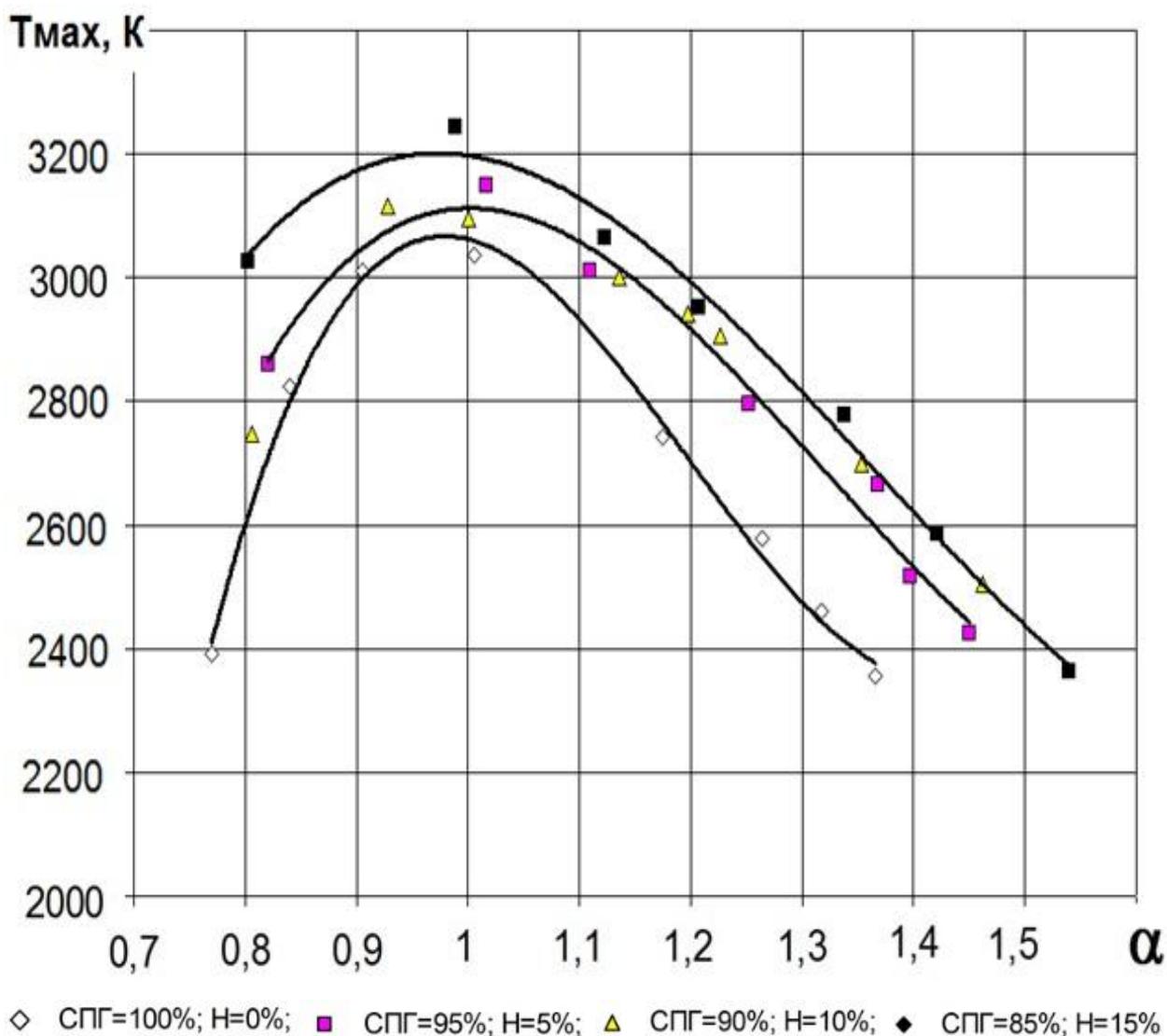


Рисунок 4.2 – Зависимость максимальной температуры цикла T_{max} от состава газозвушной смеси с активирующими добавками водорода для УИТ-85

Максимальные температуры наблюдаются в богатых областях вследствие высокого давления и в бедных областях вследствие увеличения открытия дроссельной заслонки, что ведет к улучшению наполнения цилиндров, вследствие чего происходит увеличение эффективности

продувки остаточных газов. Повышение наполнения цилиндра приводит к интенсификации процесса сгорания – температура газов в цилиндре возрастает.

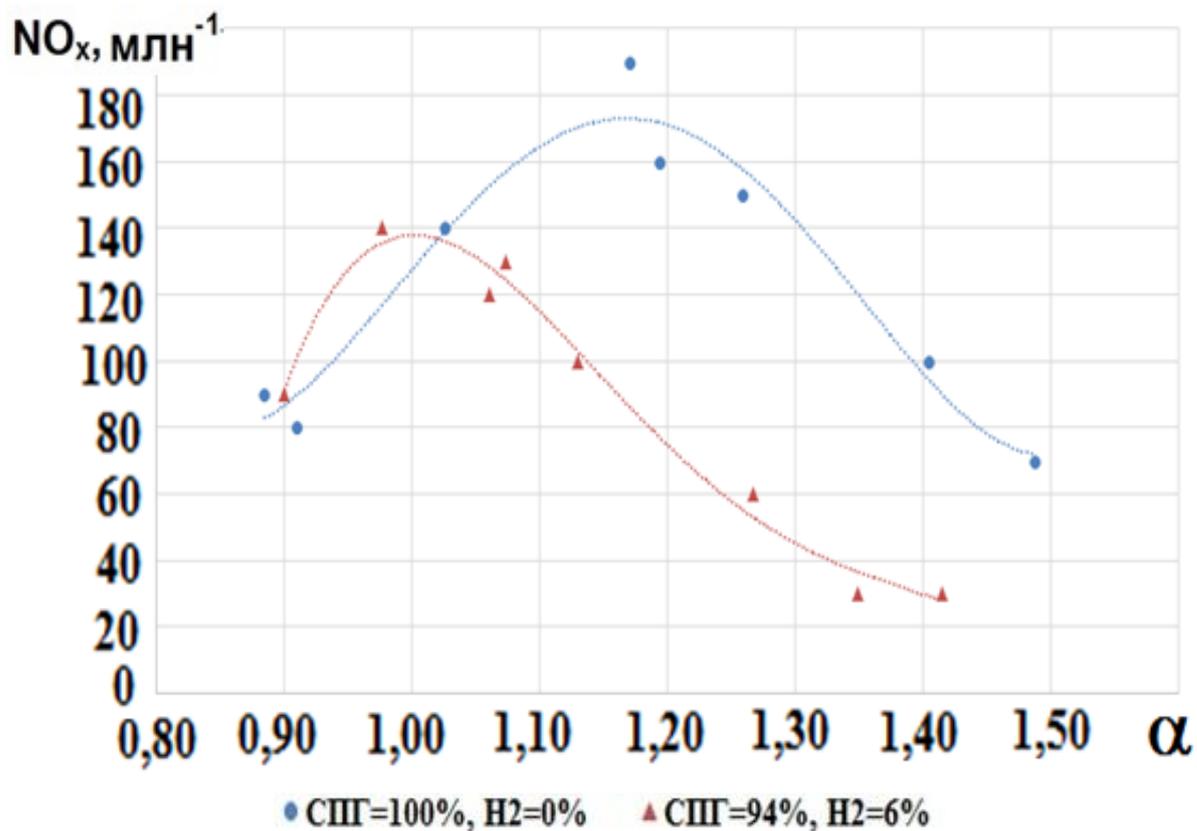


Рисунок 4.3 – Зависимость концентрации оксидов азота в отработавших газах от состава ТВС для двигателя ВАЗ-2111 на режиме холостого хода

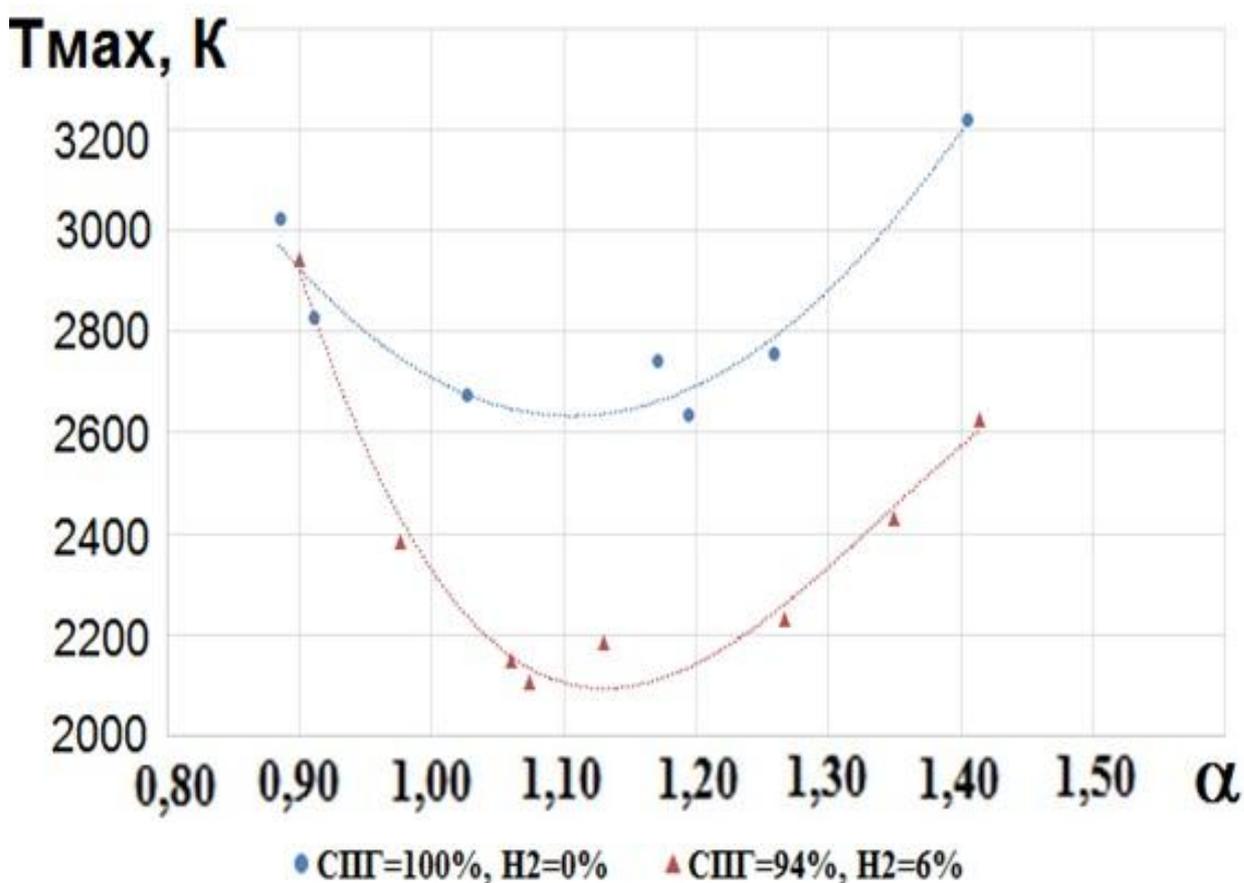


Рисунок 4.4 – Зависимость концентрации NO_x (а) и максимальной температуры цикла T_{max} (б) от состава ТВС для ВДЗ-2111 на режиме холостого хода

Об улучшении наполнения свидетельствуют давления компрессионного сжатия в циклах с пропусками воспламенения – на обедненных смесях давление выше, чем на обогащенных.

Приведена расчетная методика оценки концентрации оксидов азота в отработавших газах ДВС, работающего на газовом топливе с активирующими процесс сгорания добавками водорода (рисунок 4.5). В методике учитывается количество и масса продуктов сгорания при полном и неполном сгорании, а также количество и масса свежего заряда. После определения максимальной температуры сгорания в цилиндре были построены графики зависимости концентрации оксидов азота, как функции

от максимальной температуры в цикле, представленные для УИТ-85 на рисунке 4.5, для ВАЗ-2111 на рисунке 4.6.

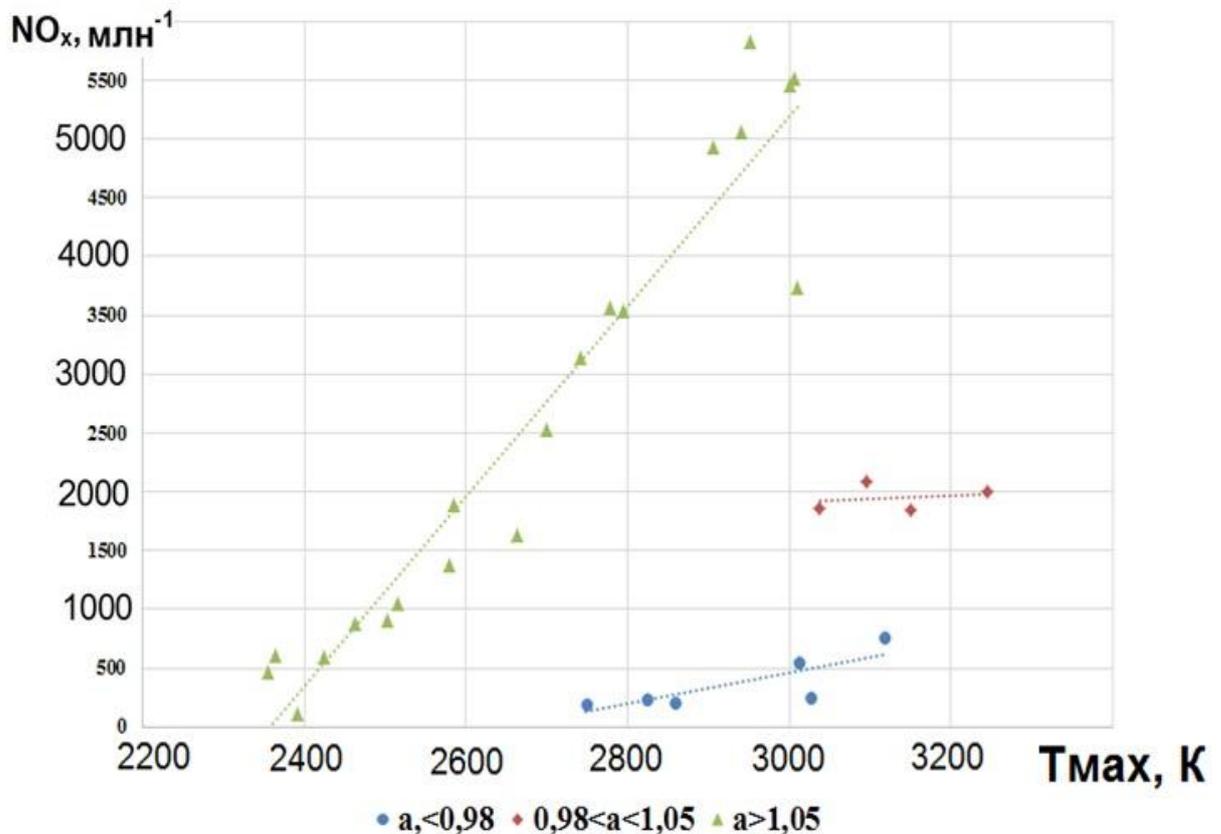


Рисунок 4.5 – Зависимости концентрации NO_x от температуры сгорания T_{max} при различных составах ТВС и добавках водорода в СПГ для УИТ-85

Для УИТ-85 имеется четкая линейная зависимость концентрации оксидов азота в отработавших газах от состава смеси и максимальной температуры цикла, но эти прямые характерны только для трех диапазонов составов смеси, в каждом из которых имеются свои условия сгорания и наличия свободного кислорода:

- для $\alpha > 1,05$

$$NO_x = 8,0608 \cdot T_z - 18996, \quad (4.2)$$

- для $0,98 < \alpha < 1,05$

$$NO_x = 0,2932 \cdot T_z - 1025,3, \quad (4.3)$$

- для $\alpha < 0,98$

$$NO_x = 1,3121 \cdot T_z - 3476,3, \quad (4.4)$$

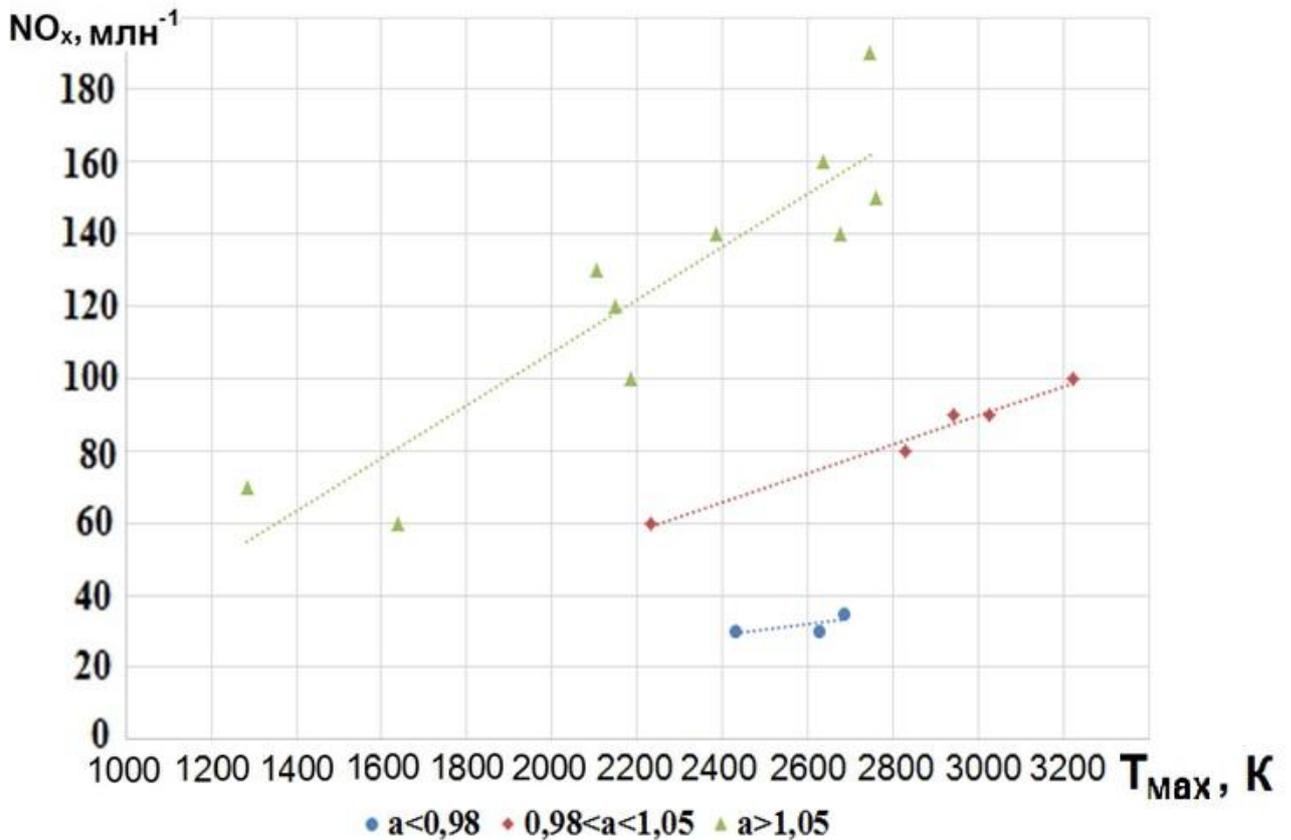


Рисунок 4.6 – Зависимости концентрации NO_x от температуры сгорания T_{max} при различных составах ТВС и добавках водорода в СПГ для ВАЗ-2111 на режиме холостого хода

Для ВАЗ-2111 также, как и для УИТ-85 имеется четкая линейная зависимость концентрации оксидов азота в отработавших газах от состава смеси и максимальной температуры цикла, но эти прямые характерны только для трех диапазонов составов смеси, в каждом из которых имеются свои условия сгорания и наличия свободного кислорода:

- для $\alpha > 1,05$

$$NO_x = 0,0734 \cdot T_z - 39,547, \quad (4.5)$$

- для $0,98 < \alpha < 1,05$

$$NO_x = 0,0401 \cdot T_z - 30,361, \quad (4.6)$$

- для $\alpha < 0,98$

$$NO_x = 0,0146 \cdot T_z - 6,038, \quad (4.7)$$

4.3 Методика определения концентрации NO_x

В данном подразделе представлена расчетная методика определения концентрации NO_x в ОГ ДВС, работающего на газовом топливе, разработанная в ходе работы над диссертацией и частично представленная в предыдущих подразделах главы 4. Методика является одним из положений, выносимых на защиту.

Перед проведением расчетной оценки концентрации окислов азота в ОГ ДВС необходимо располагать исходными данными, характеризующими конструктивные особенности и режим работы двигателя, а также условия проведения эксперимента: ход поршня S , диаметр цилиндра D , рабочий V_h и полный V_a объемы цилиндра, отношение λ , частоту вращения коленвала n , степень сжатия ϵ , УОЗ θ , фазы газораспределения, температуру воздуха на впуске T_a , расход впускного воздуха G_a , расход газообразного топлива G_f , состав топлива (соотношение между компонентами C , H , N , O), коэффициент избытка воздуха α .

4.3.1 Определение состава газообразного вещества в цилиндре установки; определение массы топлива в цилиндре за цикл и его температуры

Для достоверного нахождения концентрации окислов азота и характеристик, влияющих на образование NO_x в ОГ ДВС, необходимо верно определить состав и количество вещества в цилиндре установки. Коэффициент избытка воздуха α отражает соотношение воздух-топливо в цилиндре, коэффициент наполнения η_v показывает количество воздуха, которое может поступить в цилиндр за время открытия впускных клапанов. Для уточнения действительного состава в цилиндре необходимо учитывать забалластированность цилиндра ОГ после предыдущих циклов через коэффициент остаточных газов γ . Коэффициенты α , η_v и γ были определены по методике, представленной в [63]. Зная температуру свежей смеси и температуру отработавших газов, а также изменение давления в процессе впуска и расходные характеристики свежей смеси, из закона сохранения энергии и уравнения состояния реального газа можно однозначно определить массу рабочего тела и, следовательно, массу остаточных газов.

Коэффициент остаточных газов γ определялся из соотношения 4.8:

$$\gamma = \frac{G_{np.cг.}}{G_{св.см.}}, \quad (4.8)$$

где $G_{np.cг.}$ – расход продуктов сгорания за цикл,

$G_{св.см.}$ – расход свежей смеси за цикл.

Расход свежей смеси за цикл $G_{св.см.}$ определяется по формуле 4.9:

$$G_{св.см.} = \frac{G_t + G_a}{30 \cdot n}, \quad (4.9)$$

Для компонентов свежей смеси определялась общая удельная газовая постоянная $R_{св.см}$.

Для расчета расхода продуктов сгорания определялось количество отдельных компонентов продуктов сгорания при полном сгорании и при сгорании при $\alpha < 1$. Исходя из найденного состава ПС, была определена суммарная удельная газовая постоянная $R_{нр.сг}$. Расход продуктов сгорания определялся по формуле 4.10:

$$G_{нр.сг} = \frac{P_a \cdot V_a \cdot 10^6 - R_{св.см} \cdot T_{св.см} \cdot Zr_{св.см} \cdot G_{св.см}}{Zr_{нр.сг} \cdot T_{нр.сг} \cdot R_{нр.сг}}, \quad (4.10)$$

где P_a и V_a – давление и объем в момент завершения впуска,

$Zr_{св.см}$ и $Zr_{нр.сг}$ – коэффициенты сжимаемости для свежей смеси и продуктов сгорания, которые определяются как суммарные коэффициенты для отдельных компонентов свежей смеси и продуктов сгорания.

Коэффициент наполнения определяется как отношение объема свежей смеси поступившей в цилиндр двигателя к объему смеси, которая теоретически могла поступить в цилиндр при этих условиях, т.е. это отношение объема ТВС поступающей в цилиндр за цикл к объему цилиндра.

Коэффициент избытка воздуха определяется исходя из коэффициента избытка воздуха свежей смеси и химической активностью продуктов сгорания по методике предложенной профессором В.Ф. Каменевым.

4.3.2 Расчет политропного сжатия

Определив однозначно состав смеси в цилиндре на такте сжатия, используя теплофизические справочники с учетом характеристики теплообмена через стенку цилиндра, определяются условия политропного сжатия.

4.3.3 Проведение теплового расчета по методике Вибе

В результате проведения теплового расчета по методике профессора И.И. Вибе была определена характеристика активного тепловыделения χ по углу ПКВ φ . Продолжительность сгорания φ_z и коэффициент m , для определения характеристики тепловыделения, были определены в работе [63].

Из теплового расчета определяется максимальная температура сгорания T_{\max} .

Характеристика активного тепловыделения χ использована для расчета температуры газов в цилиндре:

$$T = \frac{V_{\varphi} \cdot P}{G_{\text{см.цикл}} \cdot Z_r \cdot (R_{\text{св.см}} \cdot (1 - \chi) + R_{\text{пр.сг}} \cdot \chi)}, \quad (4.11)$$

Суммарный коэффициент сжимаемости $Z_r = 1,15$ принят, после анализа полученных экспериментальных данных, в соответствии со справочной литературой [98].

После расчета температуры газов в цилиндре, определяют максимальную температуру цикла T_{\max} для заданного режима на заданном составе.

В соответствии с полученными в подразделе 4.3 моделями $\text{NO}_x=f(T)$, представленными в формулах 4.2...4.7, в зависимости от форм КС на режиме глубокого дросселирования определяется концентрация NO_x .

Эксперименты были проведены на режиме глубокого дросселирования (стационарный режим самостоятельного холостого хода) на установках имеющих цилиндрическую (УИТ-85) и полуклиновую (ВАЗ-2111) камеру сгорания. При проведении эксперимента на УИТ-85, был использован впускной канал удлиненной формы, поскольку необходимо было осуществить подвод воздуха из ресивера, установленного для сглаживания пульсаций и находящегося на расстоянии 4,5 м от одноцилиндровой установки.

Для применения разработанной методики определения концентрации окислов азота на двигателях с формой камеры сгорания, отличающейся от рассмотренных в работе, необходимо ввести уточняющие коэффициенты. Определение уточняющих коэффициентов для двигателей с другими формами КС и коэффициенты, позволяющие применять данную методику и модели 4.2...4.7 на более нагруженных режимах, будут производиться в будущих работах на данную тему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы могут быть представлены следующими выводами:

Проведенный анализ показал возможности снижения оксидов азота, за счет возможности варьирования составом смеси и режимом дросселирования при сохранении энергетических показателей работы ДВС за счет добавки водорода.

Разработанная методика позволит на стадии проектирования и доводки силовых агрегатов и автомобилей осуществлять расчет концентрации оксидов азота в отработавших газах ДВС добавками водорода по оценке индикаторных диаграмм давления и расчету максимальной температуры сгорания.

Для применения методики и моделей на других режимах работы двигателя с другими формами КС необходимо вводить в модели уточняющие коэффициенты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chmela, F. Konsistente Methodik zur Voraussrechnung der Verbrennung in Kolbenkraftmaschinen [Текст] / Chmela F., Dimitrov D., Pirker G., Wimmer A. // MTZ Motortechnische Zeitschrift 67 (2006) 6.
2. Christoph, K. Die Bewertung der Klopfestigkeit von Kraftgasen mittels der Methanzahl und deren praktische Anwendung bei Gasmotoren [Текст] / Christoph K., Cartellieri W., Pfeiffer U. // MTZ Motortechnische Zeitschrift 33 (1972) 10.
3. Dobski, T. Combustion of Low Calorific Natural gases in Gas Engines in Pipeline Gas Transportation Systems [Текст] / Dobski T., Wawrzyniak J., Jancy B. // in: 5. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau. 2007.
4. Dietrich, W. R. Die Gemischbildung bei Gas- und Dieselmotoren sowie ihr Einfluss auf die Schadstoffemissionen - Rückblick und Ausblick [Текст] / W. R. Dietrich // MTZ Motortechnische Zeitschrift 60 (1999) 1.
5. Franzke, D. E. Beitrag zur Ermittlung eines Klopfkriteriums der ottomotorischen Verbrennung und zur Vorausberechnung der Klopfgrenze [Текст] / D. E. Franzke // München, Technische Universität, Dissertation. 1981.
6. Дмитриевский, А. В. Топливная экономичность бензиновых двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А. В. Дмитриевский Е. В. Шатров. // Машиностроение. - М.: - 1985.
7. Дубовкин, Н. Ф. Справочник топлив и углеводородных продуктов их сгорания [текст] / Н. Ф. Дубовкин. - М.: Госэнергоиздат, 1962.
8. Защита атмосферы от промышленных загрязнений [текст]: справочник. изд. : ч. 1: пер. с английского. / С. Калверт, Эд. С. Kalvert, Inglund Г. М. - Металлургия, 1988.
9. Иванов, В. Н. техническое состояние автомобиля и токсичность двигателя [текст] / В. Н. Иванов, В. И. Ерохов // Автомобильный транспорт. №5. - М.: - 1981. - с. 39-41.

10. Иссерлин, А. С. Основы сжигания газового топлива [текст]: справка. в порядке / А.С. Isserlin. - Л. : 1987.
11. Ирисов, А. С. Испарение топлив для поршневых двигателей и методы его исследования [текст]/А.С. Ирисов //Gos. научно-техн. Эд. нефть. и добыча полезных ископаемых. М.: - с. 307.
12. Каменев В. Ф. Способ управления двигателем, работающим на топливных сборках [текст] / В. Ф. Каменев, С. А. Ефремов // Автомобилестроение. № 3-4.- 1995.
13. Pischinger, R. Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine [Текст] / Pischinger R., Klell M., Sams T.// 2. Auflage. Wien: Springer. 2002.
14. Pischinger, R. Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine [Текст] / Pischinger R., Kraßnig G., Taucar G., Sams T.// 1. Auflage. Wien: Springer. 1989.
15. Prager, M. Analytische Betrachtung und Modellierung des Betriebsverhaltens eines Gasmotors mit neuem Gaszündstrahlverfahren für hohe Leistungsdichten. München [Текст] / Prager M.// Technische Universität, Dissertation. 2010.
16. Schiffgens, H.-J. Die Entwicklung des neuen MAN B&W Diesel-Gas-Motors 32/40 DG [Текст] / Schiffgens H.-J., Brandt D., Dier L., Rieck K., Glauber R.// MTZ Motortechnische Zeitschrift 58 (1997) 10.
17. Schlick, H. Weiterentwicklung eines nulldimensionalen Brennratenmodells für direktgezündete Gasmotoren auf Basis der Computertomographie [Текст] / Schlick H., Chmela F., Pirker G., Wimmer A.// in: IX. Tagung Motorische Verbrennung – Aktuelle Probleme und modern Lösungsansätze. Haus der Technik. München. 2009.
18. Anderson, M. A Predictive Real Time NOx Model for Conventional and Partially Premixed Diesel Combustion [Текст] / Anderson M., Johansson B., Hultqvist A.// SAE-Paper 2006-01-3329. 2006.

19. Athenstaedt, G. Entwicklung stationärer Gasmotoren seit dem Inkrafttreten der TA-Luft [Текст] / Athenstaedt G. // MTZ Motortechnische Zeitschrift 54 (1993) 11.
20. Auer, M. FVV-Zylindermodul. Tutorial und Referenzhandbuch. Frankfurt am Main [Текст] / Auer M., Grill M. // 11 bis 16 in: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen. 2009.
21. Bargende, M. Ein Gleichungsansatz zur Berechnung der instationären Wandwärmeverluste im Hochdruckteil von Ottomotoren [Текст] / Bargende M. // Darmstadt. Technische Hochschule, Dissertation. 1991.
22. Barthelmä, L. Messung der örtlichen Luftbewegung im Brennraum eines Dieselmotors im Kurbelwinkelbereich der Kraftstoffeinspritzung und Verbrennung [Текст] / Barthelmä L. // Abschlussbericht zu Vorhaben Nr. 244. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen. 1977.
23. Beran, R. Entwicklung des H17/24G - Dem ersten koreanischen Gasmotors [Текст] / Beran R., Baufeld T., Philipp H., Kim J.T., Kim J.S. // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007.
24. Blizard, N.C., Keck, J.C. Experimental and Theoretical Investigation of Turbulent Burning Model for Internal Combustion Engines [Текст] / Blizard N. C., Keck J. C. // SAE Paper 740191. 1974.
25. Bonnevie-Svendsen, A. Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition [Текст] / Bonnevie-Svendsen A., Boulouchos K., Lämmle Ch., Vlakov I. // in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009.
26. Boulouchos, K. Zur Modellbildung des motorischen Verbrennungsablaufes / Boulouchos K., Papadopoulos S. // MTZ Motortechnische Zeitschrift 45 (1984) 1.

27. Boulouchos, K. Optimale Auslegung umweltfreundlicher Gasmotoren mit Hilfe von Simulationswerkzeugen [Текст] / Boulouchos K., Zbiorczyk A., Inhelder J., Frouzakis Ch. // MTZ Motortechnische Zeitschrift 58 (1997) 9.
28. Ceviz, M. A. Temperature and air-fuel dependent specific heat ratio functions for lean burned and unburned mixture [Текст] / Ceviz, M. A., Kaymaz, I. // Energy Conversion and Management 46. 2005.
29. Chmela, F. Simulation der Verbrennung bei Vorkammer-Großgasmotoren [Текст] / Chmela, F., Dimitrov, D. // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007.
30. Grill, M. Quasi-Dimensional Modeling of Spark Ignition Engine Combustion with Variable Valve Train [Текст] / Grill M., Bargende M. // SAE Paper 2006-01-1107. 2006b.