

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

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Разработка и обоснование методов обеспечивающих  
выполнение действующих и перспективных норм экологичности

Stage

Студент

В. В. Семченко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

А.П. Шайкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.т.н., профессор А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

к.т.н. Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

## Содержание

Введение.....	4
1 Перспективы использования природного газа в двигателях внутреннего сгорания .....	7
2 Экспериментальные исследования .....	13
2.1 Цель работ.....	13
2.2 Объект испытаний .....	13
2.3 Условия проведения испытаний .....	13
2.4 Измерительное оборудование .....	16
2.4 Порядок проведения испытаний .....	17
2.4 Обработка результатов испытаний .....	20
2.5 Результаты испытаний и их анализ.....	22
3 Анализ методов совершенствования показателей газового двигателя.....	31
3.1 Использование водородосодержащих газов в двигателях внутреннего сгорания .....	31
3.2 Применение газа Брауна.....	40
3.3 Синтез-газ в качестве частично замещающего топлива для ДВС с принудительным воспламенением .....	42
3.3.1 Результаты исследования влияния синтез - газа на экономические и экологические показатели двигателя .....	44
3.3.2 Результаты испытаний при работе двигателя на холостом ходу и их анализ.....	46
3.3.3 Результаты испытаний при работе двигателя на режиме, характеризуемом частотой вращения $n=2185 \text{ мин}^{-1}$ и их анализ.....	49
Заключение .....	57
Список использованных источников.....	58
Приложение А .....	66
Приложение Б .....	67
Приложение В.....	74
Приложение Г .....	76
Приложение Д.....	79

Приложение З .....	81
Приложение К.....	92

## Введение

На долю промышленно развитых регионов, по оценкам специалистов, приходится порядка 70% всех токсичных выбросов. Для сдерживания роста выбросов вредных веществ в окружающую среду начиная с 1972 г. используют законодательные документы, которые ограничивают количество токсичных компонентов, таких как CO, CH, NO<sub>x</sub> в отработавших газах (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ECE, EPA, CARB и др.) [1, 2].

Одним из наиболее эффективных способов снижения выбросов токсичных компонентов ОГ представляется применение в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) альтернативных топлив, в частности, газовых топлив [3, 4, 5]. Сжатый природный газ (CNG), а также сжиженный газ (LPG) являются привлекательными альтернативными топливами для двигателей внутреннего сгорания. В настоящее время, например, природным газом питается приблизительно 1200 тыс. автомобилей во всем мире и их число постоянно растет [1, 2]. Газовое топливо, обеспечивает более чистое сгорание, является широко распространенным и более дешевым, чем бензин. Его ресурсы во всем мире превосходят запасы нефти и по оценкам экспертов запасов газа хватит для потребностей человечества, примерно, до 2100 года. Даже значительное увеличение спроса только в небольшой степени уменьшит эти ресурсы [3]. Таким образом, применение и перевод на питание газовым топливом поршневых ДВС является перспективной и практически важной задачей, тем более, что использование газового топлива в качестве моторного имеет следствием существенное улучшение практически всех показателей двигателя.

Начиная с 2016 г. согласно ГОСТ 31967 - 2012 нормы удельных средневзвешенных выбросов при постановке на производство новых промышленных двигателей были значительно ужесточены. В частности, по удельным средневзвешенным выбросам оксидов азота (NO<sub>x</sub>) нормы уменьшены на 40%, по удельным средневзвешенным выбросам оксида

углерода (CO) и углеводородам на 60% [6]. Такое ужесточение требований к экологическим нормам приводит к необходимости проведения оценки возможности выполнения действующих, а главное потенциала по выполнению перспективных норм двигателями, находящиеся в производстве.

Целью работы является разработка методов, обеспечивающих выполнение перспективных норм экологичности Stage.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- изучение состояния вопроса на сегодняшний день по теме исследования;
- определение в условиях моторного стенда зависимости выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами двигателя с искровым зажиганием работающего на бензине, пропан-бутане и сжатом природном газе,
- сопоставления полученных результатов с действующими и перспективными нормами выбросов токсичных компонентов
- разработка рекомендаций по дальнейшему совершенствованию ДВС.

Объект исследования: двигатель внутреннего сгорания ЗМЗ-409061.10.

Предмет исследования: топливная экономичность и экологические показатели.

Научная новизна работы:

- установлены зависимости выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами двигателя с искровым зажиганием работающего на различных топливах (бензин, пропан-бутан, сжатый природный газ).
- установлена зависимость расхода топлива при работе двигателя на различных топливах (бензин, пропан-бутан, сжатый природный газ).
- установлены и доказаны особенности влияния вида топлива на экологические характеристики ДВС.

Практическая значимость работы:

- результат работы позволяет установить перспективы развития темы применения альтернативных топлив.

Апробация работы:

Основные положения работы были представлены в виде доклада на студенческих научно-технических конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и приложений. Объем диссертации составляет 97 страниц, включая 22 рисунка, 8 таблиц и 7 приложений.

В работе приведены результаты тематического обзора открытой литературы, работ, проводимых по теме исследования, оценена практическая возможность различных способов снижения расхода топлива, уменьшения эмиссии токсичных компонентов и улучшению рабочего процесса ДВС.

Результаты работы позволяют сделать выводы о дальнейшем развитии предлагаемых способов улучшения экологических и экономических параметров ДВС, а также выделить наиболее перспективные направления их исследования.

## **1 Перспективы использования природного газа в двигателях внутреннего сгорания**

«Сжатый природный горючий газ (CNG – Compressed Natural Gas) а также сжиженный природный газ (LNG – Liquid Natural Gas) также считаются привлекательными вариантами в качестве альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания. В настоящее время этим видом топлива заправляются примерно 1200 тысяч автомобилей по всему миру, из них - 40 тыс. в США» [2, 7]. «Природный газ (GN), обеспечивает более чистое сгорание, является широко распространенным веществом и более дешевым, чем бензин или газойль. Его ресурсы во всем мире являются очень большими. Даже резкое повышение спроса лишь в небольшой степени уменьшит эти запасы» [1]. Поэтому не предвидится, что развитие транспортных средств, применяющих в качестве топлива природный газ (GN), приведет к существенному росту его цены. Напротив, по оценкам экспертов, цены на газ будут только снижаться.

Двигатели, питаемые природным газом, характеризуются сравнительно невысокой эмиссией реактивных углеводородов, CO и твердых частиц. Основным составляющим природного газа является метан (85...95%). К остальным компонентам следует отнести сложные углеводороды, азот и воду. Вследствие того, что молекулы метана окисляются без промежуточных продуктов, эффективное сгорание и низкий уровень эмиссии токсичных компонентов возможны в случае сгорания при достаточном количестве воздуха. В идеальных условиях сгорания отработавшие газы содержат только четыре компонента: водяной пар, CO<sub>2</sub>, азот и избыточный кислород.

В реальном процессе сгорания отработавшие газы содержат несгоревшее или частично окисленное топливо, окись углерода (CO), окись серы, окись азота (NO), двуокись азота (NO<sub>2</sub>), которые обычно представляются как NO<sub>x</sub>, а также твердые частицы PM, образующиеся вследствие попадания в камеру сгорания смазочного масла [2, 7].

Главным токсичным компонентом ОГ при работе двигателя на природном газе является несгоревший метан. Причиной этого являются неправильные пропорции составляющих топливовоздушной смеси, а также неполное перемешивание реагентов. Так как образующиеся при сгорании метана отработавшие газы химически менее активны, чем газы, содержащие тяжелые углеводороды, возникающие в процессе сгорания бензина и дизельного топлива, они незначительно загрязняют воздух. [2, 5]. Проблемой, как в процессе сгорания метана, так и в случае любого другого топлива, является выделение NOx [2, 3, 7, 8, 9]. Избыток воздуха, образующийся при сгорании обедненной смеси, приводит к снижению эмиссии NOx. В процессе сгорания обедненных смесей уменьшается эффективность окислительных нейтрализаторов из-за низкой температуры отработавших газов, излишка окисляющего вещества ( $O_2$ ) и отсутствия восстанавливающих NO компонентов - CO и  $H_2$  в отработавших газах, которые являются необходимыми для восстановления молекулы NOx. В двигателях, питаемых GN, со сгоранием стехиометрических смесей для контроля за содержанием NOx применяется трехкомпонентный нейтрализатор с обратной связью и рециркуляция продуктов сгорания. Эмиссия NOx возникает в результате окисления азота воздуха с участием химически активных частиц. Чем выше температура сгорания, тем выше уровень эмиссии NOx. Так как двигатели, питаемые природным газом, характеризуются высокой степенью сжатия, проблема снижения эмиссии NOx решается часто путем снижения температуры сгорания, в результате добавления газообразного продукта, имеющего высокую теплоемкость. Достигается это с помощью EGR (рециркуляции продуктов сгорания). Возможно это, однако, только на частичных режимах, так как на режимах полной нагрузки рециркуляция продуктов сгорания снижает мощность двигателя. Выброс NOx в отличие от несгоревшего метана является непосредственной причиной загрязнения воздуха, поэтому следует предпринять меры с целью уменьшения его количества. Существует прямая



связь между эмиссией NOx и углеводородов (HC) в двигателях с искровым зажиганием. Минимальная эмиссия HC имеет место тогда, когда коэффициент избытка воздуха близок к стехиометрическому показателю. В этих условиях температура сгорания близка к своему максимальному значению и поэтому эмиссия NOx достигает максимума [2, 10, 11, 12, 13, 14].

Молекула метана содержит один атом углерода и четыре атома водорода, что является низким соотношением по сравнению с другими топливами. В результате этого природный газ называют топливом «обедненным углеродом», что является причиной возникновения в малом количестве CO и CO<sub>2</sub>. У двигателей, питаемых стехиометрической смесью - эмиссия CO из двигателей, заправляемых природным газом, является более высокой, чем у работающих на бедной смеси, но ниже чем в случае применения бензина или дизельного топлива. Небольшое количество серы в природном газе (приблизительно 8-30 ppm) содержится, в основном, в пахучих веществах, добавляемых с целью определения неплотностей. Сера окисленная в процессе сгорания и ее окись является одним из продуктов сгорания.

Конвертированные двигатели, питаемые природным газом, характеризуются более высоким коэффициентом полезного действия, чем двигатели, работающие на бензине, а к.п.д. двигателей, приспособленных к сгоранию бедной смеси, близок к к.п.д. дизельного двигателя. Октановое число метана, являющегося основным компонентом природного газа, определенное по исследовательскому методу (LOB), равно 130, поэтому он обладает превосходными антидетонационными свойствами, благодаря чему можно значительно увеличить степень сжатия двигателя [2, 15].

Однако в битопливных двигателях, разработанных на основе бензиновых и приспособленных для использования природного газа, в зависимости системы питания базового двигателя мощность снижается на 10-20%. Важным является то, чтобы давление в цилиндре после перевода двигателя на газ не было выше, чем допустимое давление. Природный газ как топливо не должно

испаряться с целью его воспламенения, что является необходимым в случае применения жидких топлив, поэтому отсутствует проблема холодного запуска. Возможность применения при низких температурах является большим преимуществом природного газа по сравнению, например, со спиртовыми топливами. Проблемой является его размещение на автомобиле. Для того чтобы хранить природный газ в жидком состоянии (LNG), требуется применение низких температур (при 0,1 МПа составит  $-161,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Воздействие тепловой энергии из окружающей среды на топливный бак, в котором хранится природный газ, приводит к росту давления в баке, в результате чего газ вытекает через различные негерметичные соединения в окружающую среду или попадает в двигатель. Интенсивная эксплуатация автомобилей снижает потери, возникшие в результате испарения. Если автомобиль, питаемый LNG, стоит на стоянке больше двух недель, клапан системы открывается, что приводит к большой потере топлива. Большими проблемами являются доступность LNG, а также возможность взрыва во время автомобильной катастрофы или повреждения бака. Лучшие перспективы имеет применение в качестве топлива CNG, чем LNG. Природный газ значительно безопаснее. Из-за того, что сжатый природный газ легче, чем воздух, он быстро рассеивается в атмосфере. Температура вспышки природного газа равна  $648\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что значительно выше, чем температура вспышки бензина [15]. Он характеризуется также узким пределом воспламеняемости, что препятствует случайному возгоранию. Единственной проблемой, связанной с безопасностью, является необходимость содержать автомобиль в специально вентилируемом помещении или под открытым воздухом [2].

Природный газ является смесью нескольких газов, указанных в таблице 1 [2] приведен состав газа, применявшегося при проведении исследований.

Таблица 1 - Компоненты природного газа

Компонент	Объемная доля [%]	Массовая концентрация [%]
Метан	92.29	84.37

Этан	3.60	6.23
Пропан	0.80	2.06
Бутан	0.29	0.99
Пентан	0.13	0.53
Гексан	0.08	0.39
CO <sub>2</sub>	1.00	2.52
Водород	1.80	2.89
Вода	0.01	0.01
Всего	100.00	100.00

Вероятно, самой большой проблемой, связанной с использованием природного газа, является наличие автозаправочных станций, оборудование которых является достаточно дорогим.

Пропорции между данными компонентами зависят от источника месторождения, а также от состава добавляемого газа, происходящего из другого источника. Изменение состава GN приводит к изменению калорийности и некоторых топливных характеристик. В результате этого необходимым является изменение количества смешиваемого воздуха, с целью обеспечения стехиометрического состава. Следовательно, возникают дополнительные проблемы, связанные с управлением двигателя.

Избыток воды в GN может являться причиной возникновения коррозии цилиндров и топливной системы двигателя.

Ниже представлены различные возможности приспособления двигателей для питания их сжатым природным газом:

1. Конвертация существующих двигателей, проводимая путем изменения или вставки новых элементов, создающая возможность использования в качестве топлива CNG. В основном, производитель автомобиля не дает на такие двигатели гарантии.

2. Новые двигатели - это относится к двигателям, выпущенным на заводе и в заводских условиях, приспособленных к питанию CNG.

3. Специальные двигатели, приспособленные исключительно для питания CNG. Ими могут быть модернизированные или новые двигатели.

4. Двигатели, работающие попеременно на двух топливах. Выбор топлива осуществляется с помощью механического или автоматического переключателя.

## **2 Экспериментальные исследования**

При выполнении работ принят экспериментальный метод исследований путём снятия характеристик ДВС, что объясняется необходимостью получения результатов, в наибольшей степени соответствующих реальным значениям исследуемого объекта, и невозможностью выполнения данных исследований теоретическим методом, в связи со сложностью исследуемых процессов и их теоретического описания.

### **2.1 Цель работ**

Целью работы является определение в условиях моторного стенда зависимости выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами двигателя с искровым зажиганием работающего на различных топливах (бензин, пропан-бутан, компримированный природный газ).

### **2.2 Объект испытаний**

Объектами испытаний является поршневой, четырехцилиндровый, четырёхтактный, с искровым зажиганием двигатель производства ОАО ЗМЗ рабочим объёмом  $V_h = 2,7$  л, степенью сжатия  $\varepsilon = 9$  (ЗМЗ-409061.10 в комплектации «бензин»). Спецификация комплектации двигателя, представлена в приложении А.

Конструкция двигателя и всех его систем (исключая электронную систему управления, ЭСУД), условия функционирования разработаны ОАО ЗМЗ. Спецификация электронной системы управления двигателем (ЭСУД) на базе контроллера АВIT 12.2 представлена в приложении Б.

### **2.3 Условия проведения испытаний**

Испытания проводятся в моторном боксе Тольяттинского государственного университета расположенного на кафедре «Энергетические машины и системы управления», содержащем оборудование в соответствии с ГОСТ 14846 – 81 [16], при температуре воздуха  $T_a$  от плюс 20 до плюс 40 °С и

давлении соответствующем диапазону среднестатистических значений изменения атмосферного давления.

Дополнительно моторный бокс оборудовался системами измерений и подачи газа.

На рисунке 2.1 и 2.2 представлены принципиальные схемы испытательного стенда для проведения работ при работе двигателя на бензине и газовом топливе соответственно.

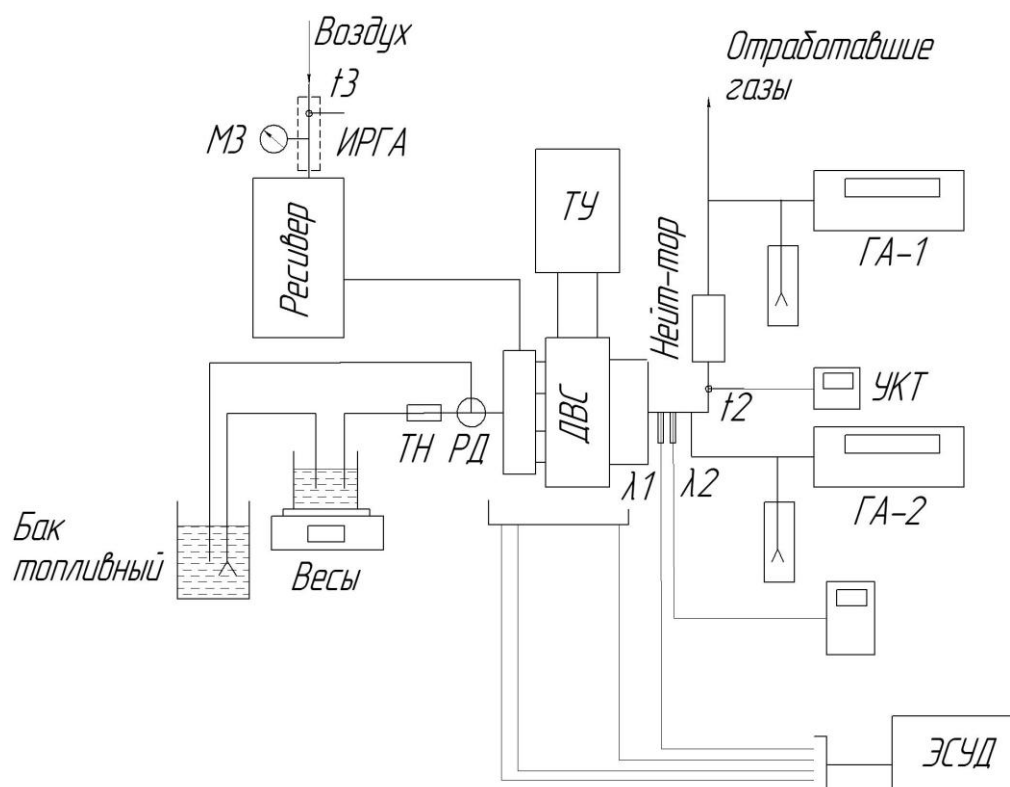


Рисунок 2.1 - Принципиальная схема испытательного стенда при работе ДВС на жидком топливе

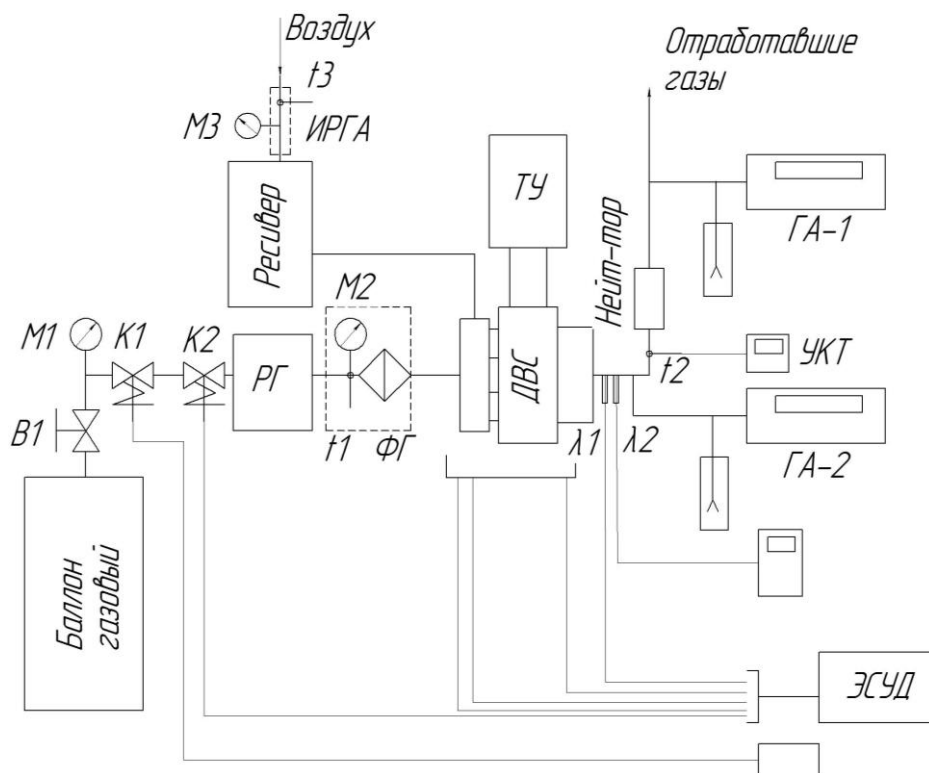


Рисунок 2.2 - Принципиальная схема испытательного стенда при работе ДВС на газовом топливе (LPG/CNG)

На рисунках приняты следующие обозначения:

- ГА-1, ГА-2 - газоанализаторы;
- В1, В2 - вентиль запорный;
- М1, М2, М3 - манометр и/или датчик давления;
- К1, К2 - клапан электромагнитный отсечной;
- ТН - топливный насос;
- РД - регулятор давления в топливной системе;
- УКТ - универсальный измеритель температуры;
- λ1 - широкополосный λ-зонд;
- λ2 - штатный датчик кислорода ЭСУД;
- t1, t2, t3 - датчики температур;
- ФГ - фильтр газовый;
- РГ - газовый редуктор;
- ИРГА - измеритель расхода воздуха;

- ТУ - тормозное устройство;
- ЭСУД - электронная система управления двигателем;
- ДВС - двигатель внутреннего сгорания.

Подробно состав и спецификация использованного газового оборудования представлена в приложении В.

После подготовки систем бокса проводятся предварительные испытания, в результате которых определяются и уточняются необходимые параметры и настройки как самого стенда, так и измерительного оборудования.

## 2.4 Измерительное оборудование

Таблица 2.1 – Перечень измерительного оборудования

Наименование средств измерений	Тип, фирма	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений
1	2	3	4
Тормоз гидравлический	SCHENK № LLF0401		
Весы для измерения крутящего момента	SCHENK № NRD6732	$\pm 0,5$	1 - диапазон: 0 ÷ 20 кг·с 2 - диапазон: 15 ÷ 50 кг·с
Канал измерения числа оборотов: - датчик числа оборотов	ЭСУД 40904.3847010 DG-6-K, Bosch 0 261 210 302	$\pm 20 \text{ мин}^{-1}$	(0 ÷ 4000) мин <sup>-1</sup>
Температура окружающей среды: - термосопротивление	ТСП-Н Pt100	$\pm 2 \%$	(-50 ÷ 400) °С
Давление окружающей среды: - барометр-анероид	МД-49-2 №154	$\pm 1$	(600 ÷ 800) мм рт.ст.
Измеритель давления топлива в рампе	Манометр	Кл. т. 2,5	(0 ÷ 6,0) кгс/с <sup>2</sup>
Канал измерений температуры отработавших газов: - преобразователь	УКТ-38-Щ4-ТП	$\pm 1 \%$	(0 ÷ 1000) °С
- термопара	ХК Т-49-5	$\pm 2 \%$	(-200 ÷ 1200) °С



Канал измерений температуры охлаждающей жидкости:	ЭСУД 40904.3828000 TF-W, Bosch 0 280 130 093	$\pm 5 \%$	$(-35 \div 150) ^\circ\text{C}$
Канал измерения расхода воздуха: - счетчик газа	ИРГА-2	$\pm 0,2 \%$	$(0 \div 500) \text{ м}^3/\text{ч}$
Канал измерения давления и температуры воздуха во впускном коллекторе	ЭСУД 40905.3829010 DS-S3-TF, Bosch 0 261 230 217	Не менее 2%	$(0 \div 0.1) \text{ МПа}$
Измеритель влажности окружающего воздуха	Гигрометр психометрический ВИТ-2	0,2	$(10 \div 100) \%$ относ. влаж.
Состав отработавших газов:			
СН (углеводороды)	Газоанализатор фирма «МЕТА» «Автотест02.03.П»	Абс. $\pm 10 \text{ ppm}$ $\pm 5\%$	$(0 \div 200) \text{ ppm}$ $(200 \div 2000) \text{ ppm}$
СО (оксид углерода)		Абс. $\pm 0.03\%$ $\pm 3\%$	$(0 \div 1) \%$ $(1 \div 5) \%$
СО <sub>2</sub> (диоксид углерода)		Абс. $\pm 0.5$ $\pm 4\%$	$(0 \div 12.5) \%$ $(12.5 \div 16) \%$
$\lambda$ -параметр		Не нормируется	
NO <sub>x</sub> (окислы азота)		Абс. $\pm 50 \text{ ppm}$ $\pm 5\%$	$(0 \div 1000) \text{ ppm}$ $(1000 \div 5000) \text{ ppm}$
Измеритель $\lambda$ -параметр: - преобразователь		Innovate motorsport LM-1 Bosch 0258 007361	$\pm 0.01$
- датчик кислорода широкополосный			
Весы электронные	DL-3000WP	Абс. $\pm 0.02$	$(0.01 \div 3200) \text{ гр.}$

## 2.4 Порядок проведения испытаний

Работы проводились в два этапа. На первом этапе проводился монтаж, и отладка моторного стенда с установленным на него двигателем, систем топливоподачи и систем измерения. На рисунках 2.3 – 2.4 для иллюстрации

представлен фотографии моторного стенда с установленным на него двигателем, системами топливоподачи и измерения токсичности.



Рисунок 2.3 – Системы подачи природного и сжиженного газа



Рисунок 2.4 – Двигатель на стенде

После монтажа и отладки двигателя и систем на стенде проводились пробные пуски двигателя с целью калибровки датчиков ЭСУД двигателя и определения оптимальных по токсичности параметров регулирования двигателя.

На втором этапе проводились измерения токсичности отработавших газов двигателя в порядке и на режимах идентичных режимам испытаний ISO 8178-1 [17].

Перед началом работ проводился контрольный осмотр двигателя на предмет наличия течей технических жидкостей и контроль их уровня. В случае необходимости производилась доливка технических жидкостей. Также проверялась герметичность топливных магистралей. Затем осуществлялся прогрев средств измерений.

Далее осуществлялся пуск и прогрев двигателя при нагрузке не менее 80% от объявленной (номинальной или полной) мощности до стабилизации параметров двигателя согласно рекомендациям завода изготовителя. Далее проводились измерения параметров двигателя по циклу, в последовательности предусмотренная ISO 8178-1.

Испытания проводились последовательно на всех режимах испытательного цикла согласно их нумерации в порядке возрастания (таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Испытательный цикл

Номер режима (цикл D2)	1	2	3	4	5	-	-	-	-	-	-
Частота вращения	Объявленная частота вращения, $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$					Промежуточная частота вращения					Минимальная частота вращения холостого хода
Крутящий момент, %	100	75	50	25	10	-	-	-	-	-	-
Крутящий момент, Нм	180	135	90	45	18	-	-	-	-	-	-
Крутящий момент, кг с	25,7	19,3	12,8	6,4	2,5						

Мощность, кВт	47	35	23	12	4,7	-	-	-	-	-	-
Весовой коэффициент	0,05	0,25	0,3	0,3	0,1	-	-	-	-	-	-

Минимальная продолжительность режима составляла не менее 10 минут. Измерение и запись концентрации газообразных компонентов выпуска производилась в течение не менее 3 мин. Для расчета выбросов использовались результаты измерений, полученных в течении последних 60 секунд из указанного 3-минутного периода.

## 2.4 Обработка результатов испытаний

Результаты испытаний считают достоверными, если в течение времени проведения испытаний фактор  $F$  остается в пределах  $0,93 < F < 1,07$ .

Атмосферный фактор  $F$  определялся по формуле:

- для двигателей без наддува

$$F = \left( \frac{99}{p_a} \right) \left( \frac{T_a}{298} \right)^{0,7}$$

где  $p_a$  и  $T_a$  – соответственно атмосферное давление и температура окружающей среды.

Параметры работы ДВС определяются в соответствии с требованиями ГОСТ 14846-81, в частности:

эффективная мощность определяется по формуле:

$$N_e = \frac{M \cdot n}{9550} \quad [Bm \cdot \frac{1}{s}]$$

где  $M$  - крутящий момент двигателя в нм,  $n$  – частота вращения коленчатого вала в мин<sup>-1</sup>;

- расход жидкого топлива (бензина) определяются по формуле:

$$Gm = 3,6 \cdot 10 \cdot \frac{\Delta G_m}{\tau} \left[ \frac{кг}{ч} \right],$$

где  $\Delta G_m$  – масса (навеска) топлива расходуемая за время проведения измерений,  $\tau$  - время измерения.

Расход газа через двигатель определяется по формуле:

$$G_2 = 3,6 \cdot 10 \cdot \frac{\Delta V_2 \cdot \gamma_t \left[ \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \right]}{\tau},$$

где  $\Delta V_2$  – объём газа в м<sup>3</sup>,  $\gamma_t$  – плотность газа при испытаниях в кг/м<sup>3</sup>,  $\tau$  - время измерения.

Определение других показателей, в частности, удельного расхода, среднего эффективного давления и др. производится по ГОСТ 14846-81.

Определение количества токсичных компонентов в ОГ определяется с учетом методик предусмотренных ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения» [18].

Удельный средневзвешенный выброс  $i$ -го вредного вещества рассчитывают по формуле:

$$e_i = 0,446 \mu_i \frac{\sum_{j=1}^m c_{ij} V_{exhj} W_j}{P_e \sum_{j=1}^m \overline{P}_{ej} W_j}.$$

где  $\mu_i$  - молекулярная масса  $i$ -го вредного веществ либо его эквивалент по приведению, кг/кмоль;

$P_e$  - номинальная или полная мощность двигателя, кВт;

$\overline{P}_e$  - относительная мощность двигателя, %;

$W_j$  - весовой коэффициент  $j$ -го режима;

$V_{exhj}$  - объемный часовой расход отработавших газов, приведенный к нормальным условиям во "влажном" или "сухом" состоянии, м<sup>3</sup>/ч;

$c_i$  - объемная концентрация в отработавших газах  $i$ -го вещества, об. %.

Объемный расход ОГ измеряют любым прямым методом с последующим приведением к стандартным атмосферным условиям либо рассчитывают по измеренным значениям расхода воздуха и топлива на каждом режиме испытаний по формуле:

$$V_{exhj} = V_{air} + F_f B$$

где  $F_f$  — коэффициент приведения к нормальным атмосферным условиям расхода неразбавленных продуктов сгорания различных топлив ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ), принимаемой по таблице 2 для «сухого» или «влажного» состояния ОГ, (или коэффициент состава топлива).

$V_{air}$  - объемный часовой расход воздуха, приведенный к нормальным атмосферным условиям (давление  $p_a = 101,3$  кПа, температура  $T_a = 273$  К),  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$B$  - массовый расход топлива,  $\text{кг}/\text{ч}$ .

Таблица 2.3 - Значение коэффициента состава топлива

Вид топлива	Значение коэффициента состава топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$ , для состояния отработавших газов	
	«влажное»	«сухое»
Моторное	0,72	- 0,74
Природный газ	1,33	-1,34
Пропан-бутан	0,98	-1,00

Для расчета объемного расхода ОГ допускают другие стандартные методы, например, метод баланса углерода и кислорода.

## 2.5 Результаты испытаний и их анализ

Первичные результаты испытаний в виде протоколов представлены в приложении Г.

На рисунке 2.5 представлено изменение удельного эффективного расхода топлива (нагрузочная характеристика). Параметры регулирования двигателя, такие как состав смеси  $\alpha$ , угол опережения зажигания и др. выбирались из условия обеспечения минимальной токсичности отработавших газов.

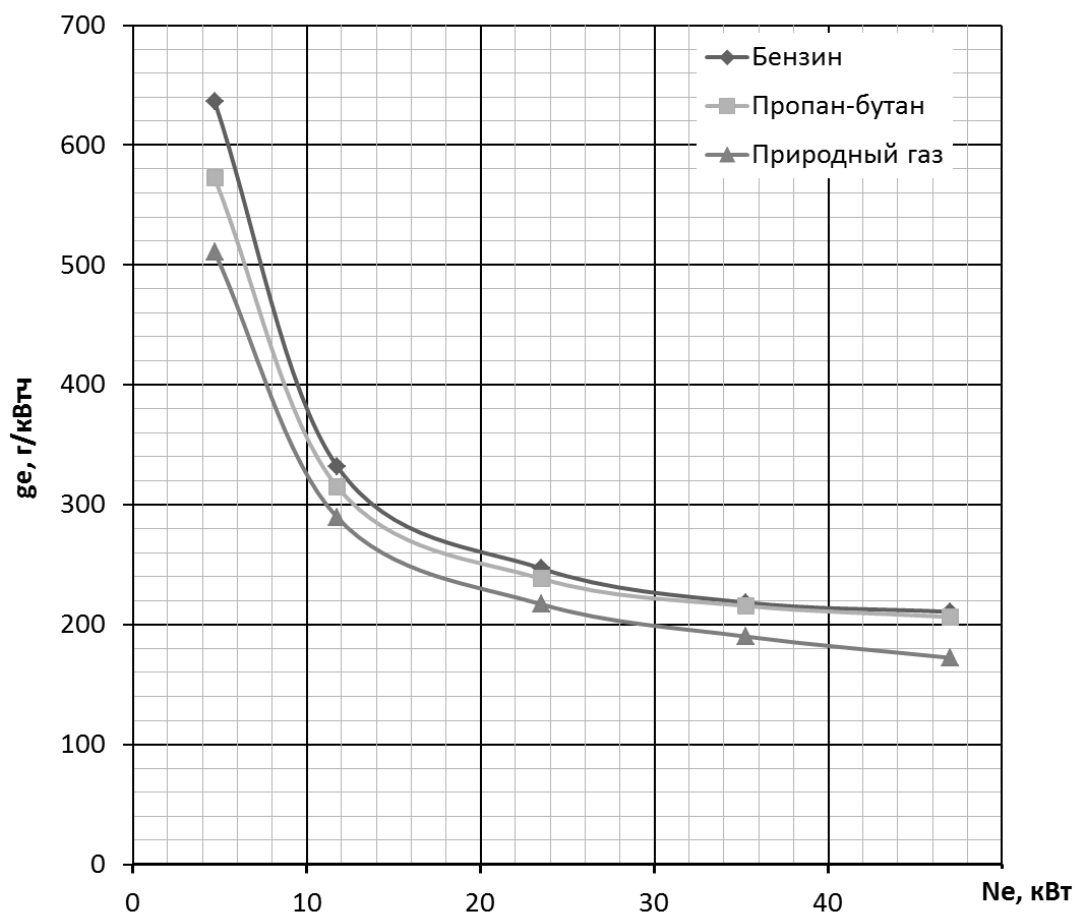


Рисунок 2.5 – Удельный эффективный расход топлива ( $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ )

Следует отметить, что значительную роль на экологические и экономические параметры оказывают значения калибровочных таблиц электронного блока управления двигателем. В приложении 3, для иллюстрации, показаны изменения параметров при работе двигателя на бензине (выборка 10 секунд). Как показали испытания, основным параметром, определяющим экономические и экологические характеристики двигателя, является реализуемый двигателем коэффициент избытка воздуха. Ниже на рисунках 2.6-2.8 представлены графики изменения коэффициента избытка воздуха при работе двигателя на разных топливах.

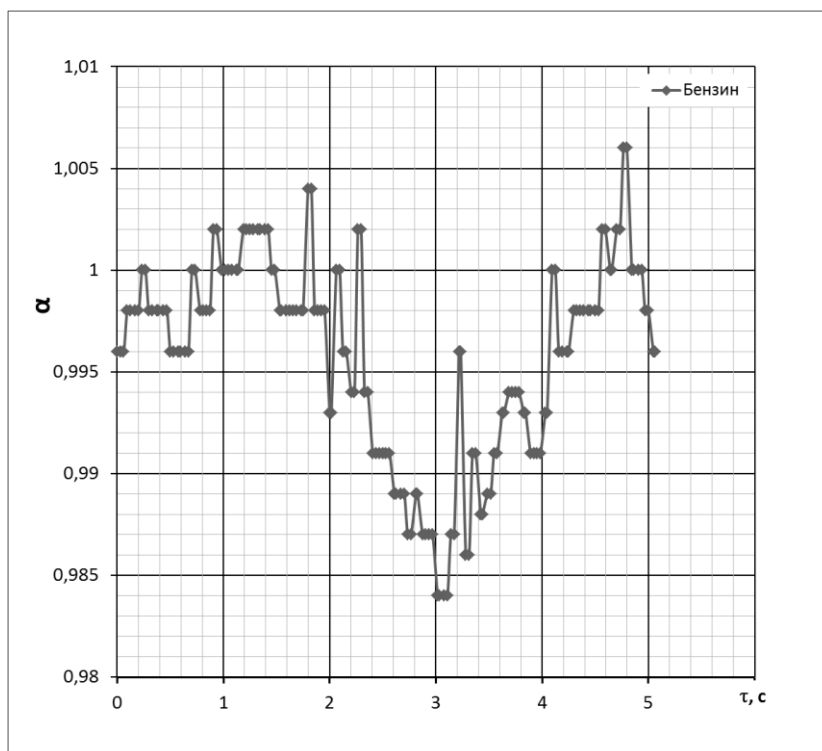


Рисунок 2.6 – Изменение коэффициента избытка воздуха (топливо –бензин,  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M_e = 18 \text{ Н м}$ )

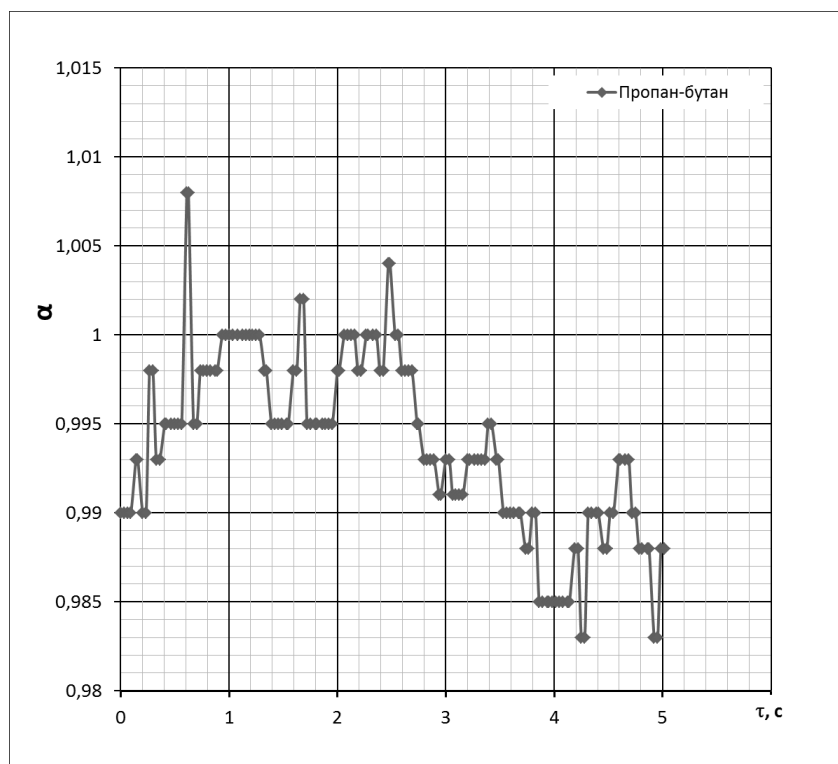


Рисунок 2.7 – Изменение коэффициента избытка воздуха (топливо –пропан бутан,  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M_e = 18 \text{ Н м}$ )



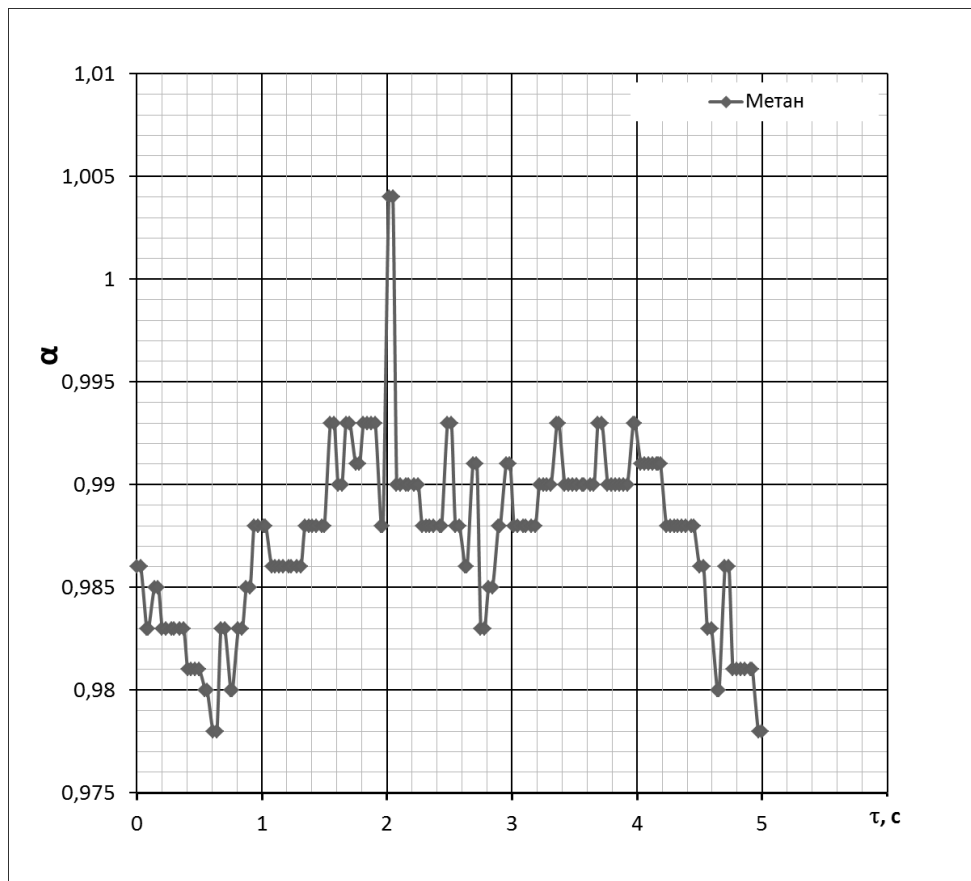


Рисунок 2.8 – Изменение коэффициента избытка воздуха (топливо –метан,  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M_e = 18 \text{ Н м}$ )

Анализ рисунков 2.6-2.8 показывает, что при работе двигателя на разном топливе необходимо реализовывать различный алгоритм изменения коэффициента избытка воздуха для обеспечения эффективной работы нейтрализатора. В частности, из рисунков видно, что период  $T$  и амплитуда  $\Delta\alpha$  различены:

- бензин  $T = 5$  секунд,  $\Delta\alpha = 0,021$ ;
- пропан-бутан  $T = 8$  секунд,  $\Delta\alpha = 0,027$ ;
- метан  $T = 10$  секунд,  $\Delta\alpha = 0,030$ .

Выбор величин  $T$  и  $\Delta\alpha$  для обеспечения эффективной работы нейтрализатора является сложной экспериментальной задачей и требует детального рассмотрения.

Таблица 2.4 – Результаты расчетов

Бензин

№	Гвозд, кг/ч	Гтопл, кг/ч	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	Весовой коэфф.	Мощность, кВт	ge, г/кВтч	QMдж/кВт ч	CO,г/кВтч	NO, г/кВтч	CH, г/кВтч
1	42	2,99	0,84	5740	110	0,1	4,7	636,1702	27,35531915	9,166473	7,362661	0,080025
2	56	3,9	0,64	5750	130	0,3	11,75	331,9149	14,27234043	11,15822	11,78373	0,151101
3	84	5,8	0,57	5900	87	0,3	23,5	246,8085	10,61276596	7,449197	9,063304	0,075799
4	112	7,7	0,5	2900	45	0,25	35,25	218,4397	9,392907801	4,838936	3,298966	0,029034
5	142	9,9	0,41	780	28	0,05	47	210,6383	9,057446809	0,755299	0,1689	0,003439
Сумма										33,36813	31,67756	0,339397

Пропан-бутан

№	Гвозд, кг/ч	Гтопл, кг/ч	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	Весовой коэфф.	Мощность, кВт	ge, г/кВтч	QMдж/кВт ч	CO,г/кВтч	NO, г/кВтч	CH, г/кВтч
1	40	2,69	0,66	5700	139	0,1	4,7	572,3404	26,78553191	6,834033	6,937579	0,095953
2	55	3,7	0,56	5900	131	0,3	11,75	314,8936	14,73702128	9,56785	11,84891	0,149213
3	85	5,6	0,63	5800	151	0,3	23,5	238,2979	11,15234043	8,306671	8,989062	0,132731
4	114	7,6	0,53	2600	103	0,25	35,25	215,6028	10,09021277	5,210689	3,004641	0,06751
5	144,5	9,7	0,41	650	61	0,05	47	206,383	9,658723404	0,766735	0,142881	0,007605
Сумма										30,68598	30,92307	0,453011

Природный газ

№	Гвозд, кг/ч	Гтопл, кг/ч	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	Весовой коэфф.	Мощность, кВт	ge, г/кВтч	QMдж/кВт ч	CO,г/кВтч	NO, г/кВтч	CH, г/кВтч
1	39,5	2,4	0,64	5800	79	0,1	4,7	510,6383	28,22695035	6,504306	6,928655	0,053525
2	57	3,4	0,59	5600	110	0,3	11,75	289,3617	15,99527187	10,37235	11,57213	0,128922
3	87	5,1	0,58	3900	143	0,3	23,5	217,0213	11,9964539	7,774024	6,144442	0,12778
4	114	6,7	0,51	1600	113	0,25	35,25	190,0709	10,50669819	4,976949	1,835325	0,073516
5	144	8,1	0,53	480	108	0,05	47	172,3404	9,526595745	0,977647	0,104075	0,013281
Сумма										30,60528	26,58462	0,397024

На рисунках 2.9 – 2.11 представлены графики изменения выбросов токсичных компонентов в отработавших газах до нейтрализатора.

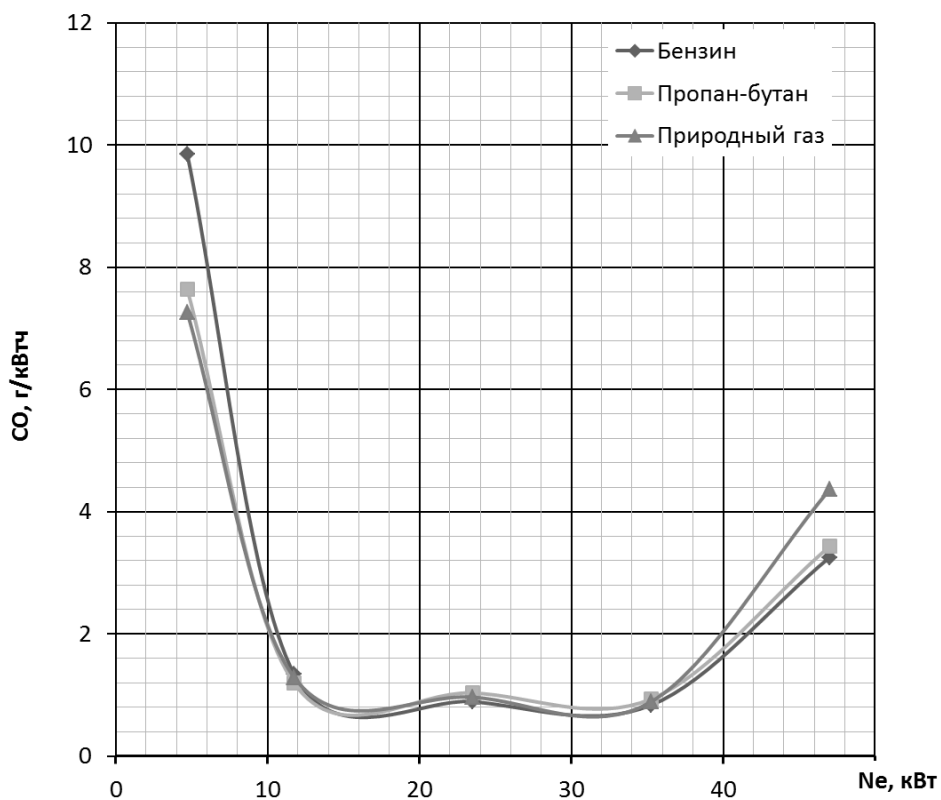


Рисунок 2.9 – Удельные выбросы оксида углерода до нейтрализатора

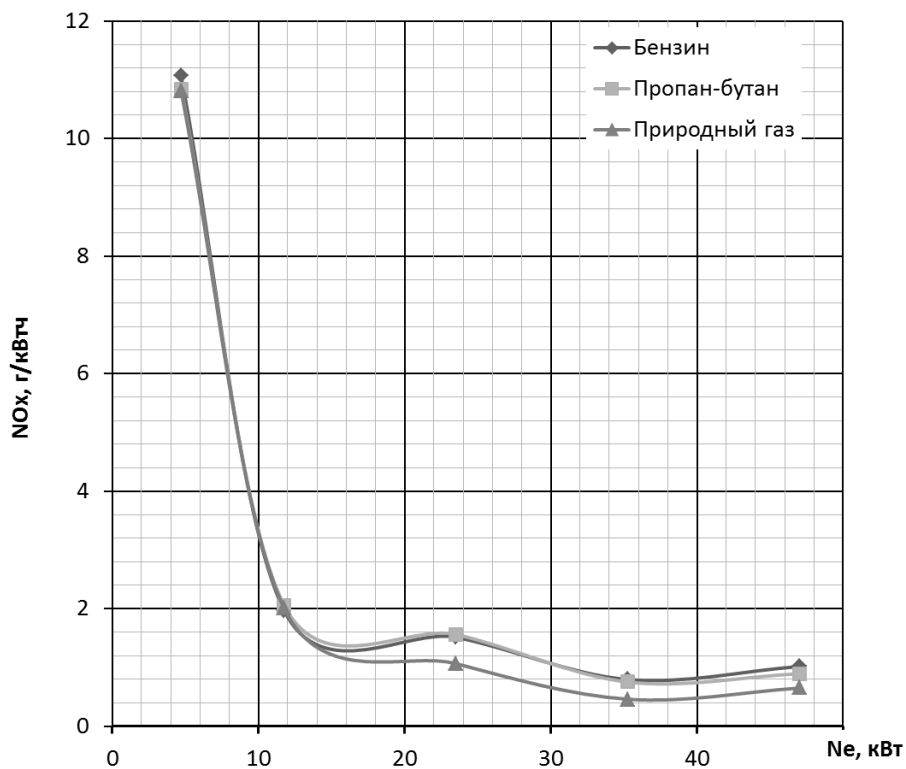


Рисунок 2.10 – Удельные выбросы оксидов азота до нейтрализатора

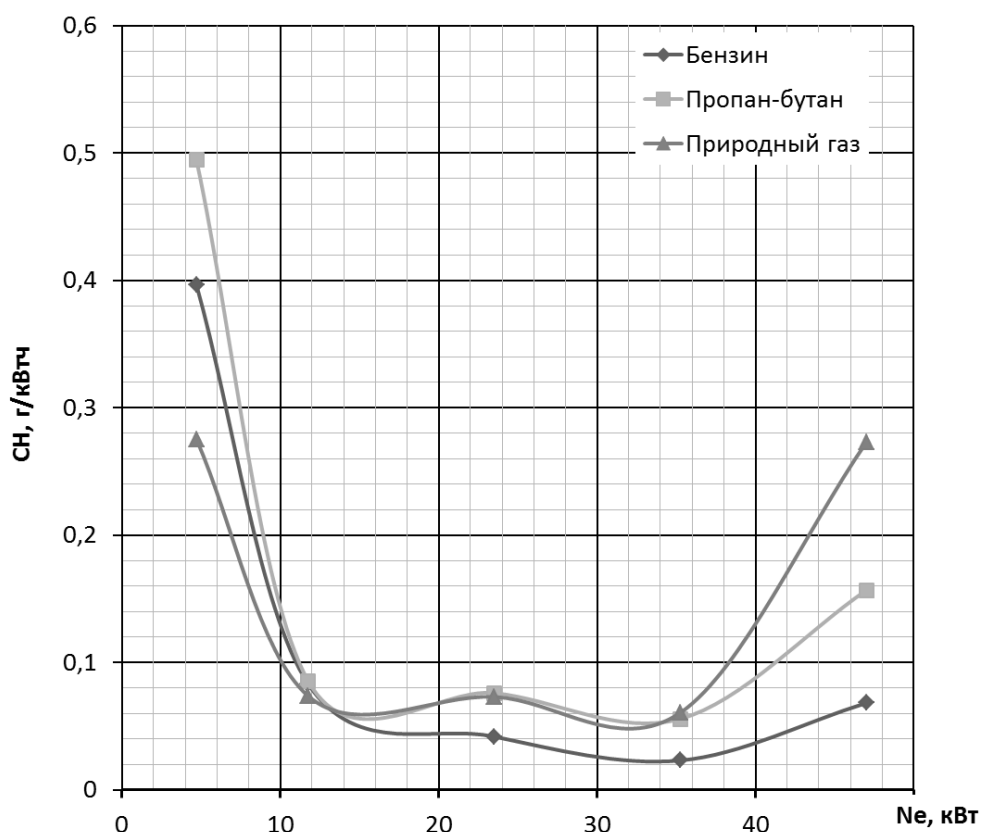


Рисунок 2.11 – Удельные выбросы углеводородов до нейтрализатора

Из представленных рисунков видно, что в диапазоне мощностей от 10 до 35 кВт удельные выбросы токсичных компонентов примерно остаются одинаковыми независимо от типа используемого топлива. Следует отметить, что испытываемый двигатель адаптировался для работы на газовом топливе только путем настройки электронной системы управления двигателем (ЭСУД). Конструктивные изменения в самом двигателе для его адаптации при работе на газовом топливе (исключая систему питания) не выполнялись.

В таблице 2.5 представлено сравнение удельных средневзвешенных выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами до нейтрализатора.

Таблица 2.5 – Удельные средневзвешенные выбросы токсичных компонентов до нейтрализатора

Параметр	Результаты испытаний		
	A-92	LPG	CNG
Удельный средневзвешенный выброс оксидов азота ( $NO_x$ ), $e_{NO}$ г/(кВт ч)	2,40	2,40	2,15
Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода (CO), $e_{CO}$ , г/(кВт-ч)	2,02	1,84	1,84
Удельный средневзвешенный выброс углеводородов (CH), $e_{CH}$ , г/(кВт ч)	0,09	0,12	0,10

Из таблицы видно, что при работе двигателя на газовом топливе значительного изменения выбросов удельных средневзвешенных токсичных компонентов не наблюдается. При этом, как видно из рисунка 2.5, топливная экономичность двигателя в рассматриваемом диапазоне мощностей при работе на газовом топливе улучшается. При работе на сжиженном газе (пропан – бутан) в среднем на 3 -5 %, при работе на природном газе в среднем на 5 -10 %. Таким образом, можно утверждать, что при использовании газового топлива имеет место снижение выбросов двуокиси углерода ( $CO_2$ ). Так как,  $CO_2$  является продуктом полного сгорания топлива и прямо пропорционально зависит от расхода топлива.

В таблице 2.6 представлены результаты оценки токсичности отработавших газов после нейтрализатора и их сравнение с нормами ГОСТ 31967 -2012.

Таблица 2.6 – Удельные средневзвешенные выбросы токсичных компонентов после нейтрализатора [59].

Параметр	Результаты испытаний			Норма удельных средневзвешенных выбросов при постановке на производство	
	A-92	LPG	CNG	до 2016 г.	после 2016 г.
Удельный средневзвешенный выброс оксидов азота ( $NO_x$ ), $e_{NO}$ г/(кВт ч)	0,011	0,007	0,004	10	6
Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода (CO), $e_{CO}$ , г/(кВт-ч)	0,324	0,238	0,265	3,5	1,5
Удельный средневзвешенный выброс углеводородов (CH), $e_{CH}$ , г/(кВт ч)	0,006	0,013	0,048	1	0,4

Результаты экспериментальных работ (таблицы 2.4, 2.5) позволяют сделать вывод о возможности выполнения действующих норм токсичности двигателем ЗМЗ-409061.10 попадающего под действие требований, норм и т.д. ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения» и ГОСТ ISO 8178-4-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах» [19].

### **3 Анализ методов совершенствования показателей газового двигателя**

Традиционные способы снижения токсичности изложены в целом ряде литературы [3,14 и др.]. Общим для них является длительность и трудоёмкость доводки двигателя, потребность в использовании сложных методов, например, индицирования двигателя, а иногда и не возможность применения необходимого конструктивного решения.

Широко используемый в настоящее время метод нейтрализации ОГ не является оптимальным, т.к. направлен не на улучшение рабочего процесса двигателя, а на устранение его недостатков. Как следствие это приводит, к ухудшению топливной экономичности в среднем на 3-5%. Поэтому в настоящее время и в научном, и в практическом направлениях активно прорабатываются новые подходы к повышению экологичности двигателей внутреннего сгорания. К ним можно отнести рабочий процесс на сверхбедной смеси [20, 21], применение смесей газов с повышенным содержанием водорода, получаемых путём каталитического разложения углеводородного топлива [23], а также длительное время разрабатываемый способ применения водорода или его добавок.

#### **3.1 Использование водородосодержащих газов в двигателях внутреннего сгорания**

Применение водорода в качестве топлива для тепловых двигателей исторически связано с самим процессом создания таких двигателей: так первый двигатель внутреннего сгорания – двигатель Лёнуара (1860 г.), первые образцы турбин работали на светильном газе, представляющем собой в основном смесь водорода и оксида углерода с примесями некоторых других газов. Ещё ранее в 1841 г. в Англии был получен патент на двигатель, работающий на водороде и кислороде [24, 25, 26].

Дальнейшее развитие двигателестроения показало, что более выгодным с точки зрения экономических и технологических требований, включая

конструкторские решения как по двигателю, так и требования к инфраструктуре обслуживания транспорта, является применение жидкого топлива, получаемого в основном из нефти.

Однако уже в 20-е годы 20 века ученые и инженеры-исследователи, в частности Н.Р. Рикардо, А.Ф. Бурсталл провели первый цикл исследований по применению в поршневых двигателях в качестве топлива как чистого водорода, так и его смесей с углеводородными топливами (бензином и дизельным топливом). Общими целями данных работ являлось получение экспериментальных оценок эффективности двигателей при работе на данных видах топлива, изучение особенностей рабочего процесса и в целом работоспособности поршневых двигателей, т.е фактически сводились к поискам новых, в современной терминологии альтернативных углеводородным, топлив. При этом учитывались высокие моторные свойства водорода, в частности, самая большая из известных топлив энергоемкость на килограмм массы, что соответствует наивысшим термодинамическим показателям рабочего цикла; наиболее высокий коэффициент диффузии, что обеспечивает высокую степень равномерности топливного заряда; гомогенность топливной смеси с воздухом; широкие пределы горения и низкая энергия воспламенения; высокая скорость распространения пламени и малое расстояние гашения пламени, что определяет термодинамическую эффективность использования теплоты приближением реального цикла к теоретическому и полноту сгорания топлива.

Можно отметить, что интерес к применению водорода в качестве топлива ДВС в течение 20 века периодически усиливался и актуализировался, что связано как с научными, так и практическими аспектами: возможностью повышения показателей ДВС, кризисными явлениями в мире, ужесточением норм на токсичность, ожиданием появления новых дешёвых технологий получения водорода, возможностями эффективного его использования при малых добавках в углеводородное топливо, что обеспечит постепенный



переход к нарастающему потреблению водорода по мере совершенствования технологий его получения, возможностью развития инфраструктуры потребления по мере снижения запасов природных углеводородов [24, 27].

В частности, в 30-ые годы по результатам проведенных ранее работ в Германии и Англии были созданы автобусы, работающие на водороде или с его добавками в топливную смесь, которые эксплуатировались в экологически чистых зонах (заповедниках). Известно и применение двигателей, работающих на водороде, на дирижаблях [24].

Во время второй мировой войны работы в этом направлении были прекращены, однако первый отечественный опыт использования водорода в качестве топлива для автомобилей был получен в осажденном Ленинграде в 1941 г. Инженер Б.И. Щелищ разработал устройства, позволившие применять в автомобильных двигателях водород, используемый в аэростатах воздушного заграждения, что снизило потребность в привозном бензине.

Следующий этап широких исследований по применению водорода в ДВС можно отнести к 60-ым началу 70 гг. 20 века. В частности, были проведены широкие исследования в Новосибирске под руководством академика В.В. Струминского, в США в рамках космической программы NASA, школой И.Л. Варшавского в Институте проблем машиностроения АН УССР и Харьковском автомобильно-дорожном институте.

Можно отметить, что данный период совпал с первым энергетическим кризисом 70 гг., что привело к большей интенсификации работ в данном направлении. В частности, генеральным конструктором авиационных двигателей Н.Д. Кузнецовым был создан авиационный двигатель, работающий на водороде и прошедший этап исследовательских испытаний на самолете ТУ-154. Работами по использованию водорода в ДВС занимались целый ряд исследователей: Ю.М. Аннушкин, А.И. Мищенко, В.И. Хмыров, Г.Ф. Смаль, Е.В. Шатров, Г.В. Талда, А. Раменский и др. Результаты этих исследований широко публикуются в 80 гг.

Третий этап широкого внимания научной общественности к вопросам использования водорода в качестве топлива для транспортных двигателей можно отнести ко второй половине 90 гг. 20 века, что связано с двумя причинами: первая это исчерпаемость природных углеводородов (по разным оценкам их запасов хватит на 50 – 100 лет) и следующая из этого проблема энергобезопасности государств и вторая – ожидание получения дешевых технологий получения водорода (цена 1 кг. водорода в настоящее время пока в 2 и более раз выше бензина).

В частности, в последнее 10-15 лет интерес к применению водорода на транспортных ДВС проявляют все ведущие мировые автомобильные фирмы-разработчики: FORD, VW, OPEL, GM, TOYOTA и др., особенно усилившийся, судя по публикациям, в конце 90-х начале 2000 гг., в том числе, в связи с возможным широким использованием в качестве энергоустановок электрохимических генераторов.

Следует отметить, что начало 21 века ознаменовалось принятием в 2001-2003 гг. в промышленно развитых странах первых крупных государственных программ НИОКР в области водородной энергетики. Например, на реализацию программ «Freedom CAR» и «Freedom Fuel», выдвинутых Президентом США, из федерального бюджета намечалось выделить 1,7 млрд. \$ на 5 лет для создания водородного автомобильного транспорта на топливных элементах, водородных автономных систем энергообеспечения и инфраструктуры топливообеспечения. В странах ЕС так же предусматривается бюджетное финансирование НИОКР в размерах более 200 млн. € в год. В Японии проект «WE-NET» рассчитан до 2020 г. при финансировании 4 млрд. \$. Кроме государства в финансировании выполнения указанных программ, участвуют частные компании, причем их вклад в 2÷3 раза превышает ассигнования из государственных бюджетов [28].

Таким образом, начиная с 2000 г., практически все крупные зарубежные автомобильные и энергетические компании активно проводят НИОКР в

направлении создания транспортной энергетики, ориентированной на применение водорода, рассчитанные на период до 2020 г. и нацеленные, в том числе, на уменьшение зависимости от импорта традиционных углеводородных энергоресурсов, что отвечает интересам энергобезопасности отдельных государств.

Вместе с тем, можно отметить, что к настоящему времени единого общепринятого мнения относительно водородной энергетики в целом и применения водорода в автомобильных ДВС, в частности, не выработано. Существуют как сторонники данного направления развития энергетического машиностроения, так и противники. Показателем этому является, например, аналитическая работа [29], в которой авторы активно оппонировали взглядам на перспективность данного направления. Основным аргументом при этом является факт практического равенства КПД всей технологической цепочки от получения до применения водорода с учетом всех энергетических затрат. Например, при рассмотрении эффекта применения водорода в двигателях автомобилей необходимо учитывать экологические эффекты и затраты энергии, имеющие место при его производстве как внешними технологиями, так и бортовыми (автономными) генераторами. Аналогичные взгляды высказывают ряд других ученых: академик В.И. Субботин [30], американские эксперты в области энергетики D. Keith и A. Farrell [31].

Подробное рассмотрение и анализ известной литературы, характеризующей современное состояние знаний об эффективности применения водорода, показывает некоторую неполноту, неточность, а иногда и противоречивость данных.

Наиболее полно результаты исследований по применению водорода в качестве добавок в отечественной литературе представлены в монографии А.И. Мищенко, в которой приведены как результаты исследований показателей теоретического цикла, результаты многочисленных экспериментальных исследований, так и достигнутые практические результаты по улучшению

показателей автомобилей при применении водорода, в том числе в процессе опытной эксплуатации ряда автомобилей.

В известной зарубежной литературе наиболее полное изложение всех аспектов применения водорода в качестве топлива поршневых ДВС приведено в аналитической обзорной работе [32], из обширной библиографии которой, включающей 281 работу, большая часть из которых выполнена в 90 ÷ 2000<sup>бв</sup> гг. виден большой интерес к научным и практическим вопросам использования водорода. Можно отметить, что, по вопросам, имеющим отношение к теме настоящей работы, в цитируемой работе обсуждается некоторая спорность выводов, связанных с оценкой детонационной стойкости водорода и следующая из этого условность введения метанового числа, как характеристики детонационной стойкости газовых топлив. Кроме того, можно отметить так же, что рассматривая горение водорода, авторы не отражают результатов фундаментального исследования, выполненного еще в 40 гг. прошлого столетия А.Б. Налбандяном и В.В. Воеводским.

Рассматривая вопросы применения водорода, следует отметить и направление, связанное с использованием синтез-газов, т.е. газов в состав которых входит водород, оксид углерода  $CO$ , небольшие количества метана и др. примесей, которые так же относят к альтернативным топливам [33]. Синтез-газы получают разными способами из углеводородов (метана, бензина и т.д.), спиртов (метиловый, этиловый) [2]. Данный вид топлив известен достаточно давно, однако в последние годы ему уделяется большое внимание, т.к. имеется принципиальная возможность получения его в автономных (бортовых) генераторах, что решает проблему создания инфраструктуры обслуживания.

В работе [2] приведено сравнение показателей работы искрового ДВС при использовании в качестве топлива бензина, природного газа и синтетического газа, состоящего преимущественно из  $CO$  (52%) и  $H_2$  (44%). Было показано, что при работе на синтетическом газе происходит снижение мощности ДВС, примерно, на 20 и 30% в сравнении с использованием природного газа и

бензина, соответственно. При этом эмиссия  $CO$  и  $CH$  при работе на синтетическом газе были незначительны (на порядок меньше, чем на природном газе и бензине), однако концентрация  $NO_x$  в отработанных газах существенно возросла.

Рассмотрение направлений исследований, связанных с анализом перспектив применения альтернативных топлив для автомобильных двигателей, позволяет отметить, что в мире решение данного вопроса склоняется в пользу применения водорода и водородонасыщенных газов [52 - 64]. Таким образом, интерес к различным аспектам применения водорода и водородосодержащих газов в настоящее время сохраняет свою актуальность, как в силу недостаточного научного знания, так и неоднозначности практики его применения. Это следует, в том числе, из анализа политических решений правительств ряда стран, отражающих интерес к вопросам национальной энергобезопасности, планируемых направлений развития энергетики, в частности, их научного обоснования, а также из рассмотрения выполненных в течение последних лет работ, например [34, 35, 36, 37, 38, 39].

Выполненный анализ современного состояния и путей совершенствования показателей поршневых ДВС применением водорода показывает, что, несмотря на большое количество известных исследовательских и опытно-конструкторских работ, в настоящее время отсутствует общепринятый подход к решению данного вопроса, научное обобщение в виде формальных рекомендаций и расчётных методов оценки показателей ДВС при применении водорода и его добавок в углеводородное топливо. Известные исследования имеют экспериментальный характер и отражают, как правило, конкретные решения для исследуемого типа двигателя, не раскрывая общих закономерностей, в частности, горения углеводородных топлив в присутствии водорода [59 - 70]. Так, например, в классическом учебнике [40] содержатся некоторые общие сведения, а приведенные эмпирические расчетные зависимости не достаточны для практического

применения, поскольку не содержат конкретных величин расхода бензина и водорода в физической размерности, определяющего режим работы ДВС. В работе [41] расчетные данные в весьма необходимом для практики разделе «Оценка основных параметров электролизера и источников его питания» получены на основе предварительно принятия (т.е. экспертного задания) величины расхода водорода, а не расчета потребного его количества в зависимости от показателей двигателя.

В целом обзор известной литературы и анализ направлений и перспектив развития двигателей транспортных средств позволяет сделать следующие выводы:

- поршневые ДВС в ближайшие 30÷50 лет не имеют альтернативы и, следовательно, всестороннее исследование путей их совершенствования остаётся актуальной задачей;

- в последние 20÷30 лет произошли весьма значительные изменения в области конструктивного совершенства ДВС, в частности, электронизации его систем. При этом все известные данные по применению водорода получены при использовании механических систем, характерным уровнем техники 60÷70 гг. прошлого века. Поэтому целесообразно уточнение результатов исследований и оценки возможностей эффектов влияния водорода на основе современных комплектаций двигателей, в первую очередь системой электронного управления и распределенного впрыска топлива;

- отсутствует необходимое для законченного научного исследования обобщение результатов исследований в виде доступных в практике конструкторских разработок математических моделей и, как следствие – инженерная методика расчетов показателей ДВС при добавке водорода в бензовоздушную смесь при изменении его доли в смеси до 100%, применимая на этапе предварительного конструкторского анализа оценки эффектов влияния водорода на показатели ДВС;

– не изучены с должной степенью научной глубины проработки вопросы сгорания БВВС в цилиндре ДВС, в частности, при работе двигателя на режимах частичных нагрузок, соответствующих городскому циклу движения автомобиля;

– требуют дальнейшего изучения вопросы химической активации горения водородом, особенно при его добавках в малых количествах (промотирования горения), а также условий и эффектов его применения в ДВС;

– основные нормативные и программные документы (Перечень критических направлений РФ, Основные направления развития науки и техники РФ, Концепция развития теории горения РАН, Стратегия развития автомобильной промышленности, а также решения правительств ряда ведущих стран) указывают на необходимость и целесообразность дальнейшего теоретического и экспериментального изучения процессов организации и сжигания углеводородных топлив, насыщенных водородом, с различным соотношением горючих компонентов, необходимым для достижения практически значимых показателей;

– со времени проведения исследований применения водорода в составе автомобиля появились новые более эффективные технологии получения водорода, использование которых в качестве автономных систем в совокупности с совершенствованием конструкции ДВС и их систем может быть достаточно эффективным для практической реализации;

Проведенный обзор литературных данных позволил заключить о целесообразности постановки и выполнения исследований как процессов горения смесей углеводородов с водородом и обобщения их результатов в виде инженерной расчетной методики, так и различных вариантов практического применения водорода в ДВС с учетом современных и перспективных технологий его получения и хранения. Решение данных вопросов в научном плане позволит подготовить и использовать при необходимости в будущем

апробированные и подготовленные к применению решения и подходы и в целом оценить проблему состоятельности водородной энергетики в применении к автомобильному транспорту.

### **3.2 Применение газа Брауна**

«Газ Брауна, часто обозначаемый как ННО или гремучий газ (англ. Browns Gas, ННО gas, fire damp, detonating gas, oxyhydrogen gas) – это газ, состоящий из 2 частей газообразного водорода и одной части кислорода» [42].

Молекулярный водород является сверхкатализатором для различных видов топлива на основе углеводородов. Зарегистрированы повышение мощности, пробега и более чистое горение (уменьшение вредных выбросов) при введении газ Брауна во впускной коллектор [42, 43].

Подробные исследования по теме проводил Юл Браун, который построил демонстрационный автомобиль и получил на свою разработку патент США с подтверждением эксперимента. Это устройство состоит из электролизера, циркулярного резервуара, оптимизатора, системы управления. Способ выделения газа основывается на явлении электролиза воды. Установленный циркулярный резервуар предназначается для отделения газа от воды, он нужен также для снабжения газогенератора электролитом. Следует отметить исследования НАСА в 1977 году. Целью исследований являлось определение влияния на экономичность и экологичность двигателя добавок газа Брауна (водорода), воды и спирта к бензину путем впрыска их во впускной коллектор. По результатам исследований были сделаны выводы: добавка газа Брауна оказывает значительное влияние на рабочий процесс двигателя, при этом наблюдается повышение экономичности. Исследования также показали увеличение скорости сгорания топливоздушная смеси [42]. Подобные эксперименты проводились в конце прошлого века и в России. Результаты экспериментальных работ подтверждают выводы, полученные специалистами НАСА [46, 47, 48, 49].



Известно, что в двигателях внутреннего сгорания на отдельных режимах работы происходит неэффективно, к таким режимам относятся режим холостого хода двигателя и режимы глубокого дросселирования. Как показывает практика, именно эти режимы работы определяют токсичность и экономичность двигателя, так как на их долю приходится до 60% всего времени эксплуатации двигателя. С этой точки зрения, наиболее интересным представляется использование добавок газа только на частичных режимах работы двигателя внутреннего сгорания [50, 51, 52].

Тема газа Брауна уже известна в довольно широком кругу, но в то же время предстоит еще много изучить - например, целесообразность его применения в двигателях внутреннего сгорания как добавки к топливу. Так, в журнале *Popular Mechanics* была опубликована статья об исследованиях влияния добавок гремучего газа в топливо дизельного двигателя, выявивших возможность снижения расхода топлива при добавке гремучего газа после проведения соответствующей модернизации двигателя [44]. Следует отметить, что на кафедре «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета совместно с Московским энергетическим институтом проводились предварительные исследования влияния добавки гремучего газа на показатели бензинового двигателя. На рисунке 3.1 представлен испытательный стенд и система подачи гремучего газа в ДВС.

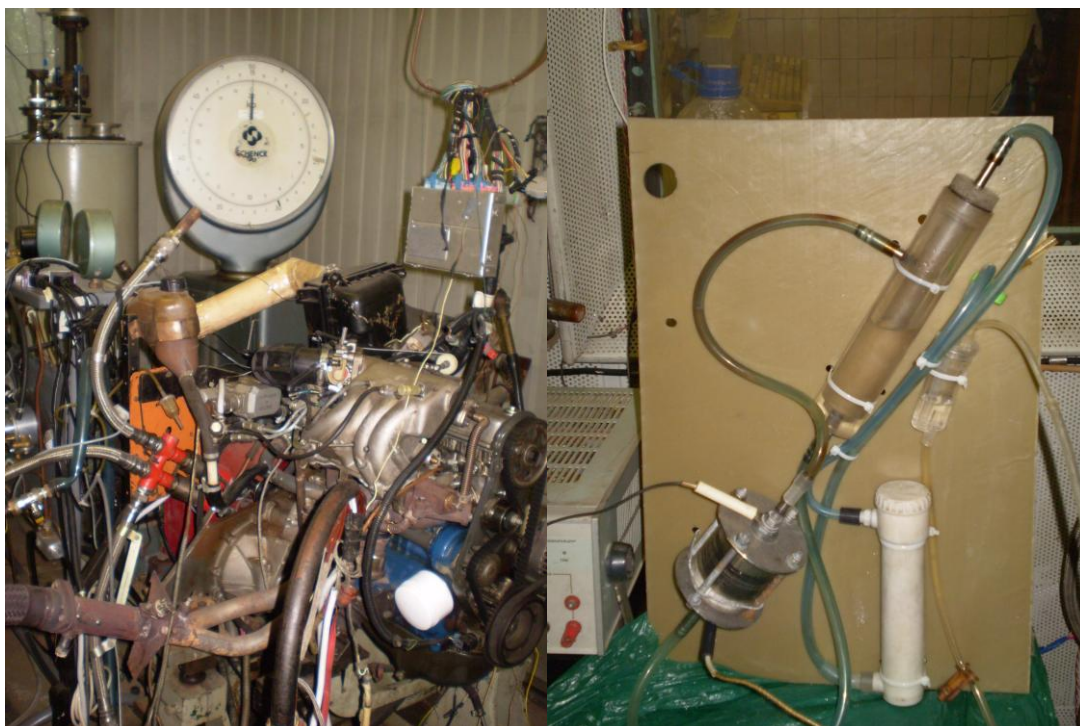


Рисунок 3.1 - Испытательный стенд и система подачи гремучего газа в ДВС

Результаты предварительных исследований показали, что применение гремучего газа, даже в небольших количествах в качестве добавки к основному топливу, заметно расширяет пределы стабильного горения топливовоздушной смеси. Увеличение коэффициента избытка воздуха, позволяет заметно повысить экономичность ДВС, а также улучшить его экологические характеристики.

### **3.3 Синтез-газ в качестве частично замещающего топлива для ДВС с принудительным воспламенением**

Практически приемлемым вариантом улучшения эффективности и экологических показателей, используемых сегодня ДВС может быть получение водородсодержащего синтез-газа из штатного углеводородного топлива (как правило, конвертируется от 5 до 20% топлива), частично замещающей основное топливо. Использование синтез-газа позволяет осуществлять работу двигателя на переобедненных топливных смесях вплоть до  $\alpha=2,5-3$ , что и дает

возможность улучшить экономические и токсические показатели работы ДВС. Современные литературные данные по применению синтез-газа в качестве основного или частично замещающего топлива для ДВС очень ограничены, хотя исследования этой проблемы ведутся с 70-х годов прошлого века [45].

В работе [20] проведено сравнение характеристик работы искрового ДВС при использовании в качестве топлива бензина, природного газа и синтетического газа, состоящего преимущественно из CO (52%) и H<sub>2</sub> (44%). Было показано, что при работе на синтетическом газе происходит снижение мощности ДВС примерно на 20 и 30% в сравнении с использованием природного газа и бензина соответственно. Хотя эмиссия CO и CH при работе на синтетическом газе были незначительны (на порядок меньше, чем на природном газе и бензине), концентрация NO<sub>x</sub> в отработанных газах выросла в несколько раз. Причину столь высокой эмиссии оксидов азота можно объяснить тем, что все эксперименты проводились в режиме с  $\alpha \leq 1,5$ .

В качестве примера, когда синтез-газ успешно используется как частично замещающее топливо в ДВС с принудительным воспламенением, можно привести НИР и ОКР, выполненные в этом направлении Институтом катализа СО РАН, г. Новосибирск; РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров; ОАО «АВТОВАЗ» и ТГУ, г. Тольятти. Участниками кооперации был разработан ряд образцов генераторов синтез-газа и проведены их испытания. Наиболее целесообразно оказалось получать синтез-газ на борту автомобиля путем осуществления каталитического процесса парциального окисления природного газа или процесса автотермической конверсии в случае бензина. В рамках этих работ были проведены краткосрочные стендовые испытания двигателя ВАЗ-2111, работающего на бензине и природном газе с добавками синтез-газа, полученного в экспериментальном каталитическом реакторе методом парциального окисления природного газа.

### 3.3.1 Результаты исследования влияния синтез - газа на экономические и экологические показатели двигателя

Экспериментальные работы по определению влияния синтез газа на показатели ДВС выполнялись путём снятия регулировочных характеристик по составу смеси на различных режимах работы двигателя внутреннего сгорания и оптимальных углах опережения зажигания (УОЗ). Первичные результаты испытаний представлены в таблицах 1-4 приложения К.

В таблице 1 приложения К приведены исходные характеристики двигателя (при работе на природном газе) для режимов работы, на которых оценивалась эффективность работы системы ДВС - ГСГ, в таблице 2 - результаты при работе двигателя с добавкой синтез газа к основному топливу, а в таблице 3 результаты, полученные при его работе на синтез газе. На рисунках 3.2- 3.10 представлены соответствующие графики таблиц 1-3. При этом в таблицах и на рисунках использовались следующие обозначения: СГ – синтезгаз; прг. – природный газ;  $n$ [1/мин] – обороты ДВС;  $p_e$ [МПа] – среднее эффективное давление нагрузки на ДВС;  $G_{\text{прг}}$  [кг/ч] – расход природного газа;  $G_{\text{в}}$ [кг/ч] – расход воздуха ДВС;  $G_{\text{прг\_гсг}}$ [кг/ч] – расход природного газа ГСГ;  $G_{\text{в\_гсг}}$ [кг/ч] – расход воздуха ГСГ;  $H_2$ [%] – процентное содержание водорода в синтез газе;  $CO_{\text{сг}}$ [%] – процентное содержание оксида углерода в синтез газе;  $H_2$ [кг/ч] – содержание водорода в синтез газе;  $CO$ [кг/ч] – содержание оксида углерода в синтез газе;  $CH_4$ [м<sup>3</sup>/ч] – содержание метана в синтез газе;  $Q_{\text{сг}}$ [МДж/ч] – теплота, подведенная в ДВС с синтез газом;  $Q_{\text{гсг}}$ [МДж/ч] – теплота, подведенная в ГСГ с топливом;  $Q$ [МДж/ч] – теплота, подведенная в ДВС с топливом;  $Q_{\text{sigma}}$  [МДж/ч] – теплота, подведенная в систему ДВС-ГСГ с топливом;  $\eta$  - КПД генератора СГ; УОЗ[гр пкв] – оптимальный угол опережения зажигания;  $\lambda$  - коэффициент избытка воздуха по газовому анализу;  $O_2$ [%] – содержание кислорода в ОГ;  $CO$ [%] – содержание оксида углерода в ОГ;  $CH$ [ppm] – содержание углеводородов в ОГ;  $NO_x$ [ppm] – содержание оксида

азота в ОГ; CO<sub>2</sub>[%] – содержание двуокиси углерода в ОГ.

При выполнении работ для измерения состава ОГ использовались газоанализатор (г/а): –производства ООО “МЕТА” (г. Жигулевск, Самарская обл.).

При выполнении экспериментальных работ, в зависимости от максимально возможного расхода СГ и режима работы ДВС, испытания проводились, как при работе двигателя на чистом СГ (режимы малых нагрузок) (см. таблицу 3 приложения Б), так и при его добавках к природному газу (при работе на частичных нагрузках) (см. таблицу 2).

Из данных таблицы 4 можно видеть, что генератор СГ обеспечил выход СГ, состоящего, в среднем, из 27,5% водорода и 9% оксида углерода (максимальные значения выхода водорода составило 30,2%).

При оценке энергетической эффективности системы ДВС - ГСГ использовались следующие расчетные формулы:

$$Q_{sigma} = \sum_{i=1}^2 G_i * H_u,$$

$$Q_{CG} = \sum_{i=1}^n G_j * H_{uj},$$

$$Q = G_{npz} * H_u + Q_{CG}.$$

Введя в рассмотрение понятие КПД генератора СГ, можем получить:

$$Q_{sigma} = G_{npz} * H_u + \frac{Q_{CG}}{\eta},$$

$$Q_{ГСГ} = \frac{Q_{CG}}{\eta},$$

где  $G_i$  – расход природного газа потребителями системы ГСГ-ДВС,  $H_u$  – низшая теплотворная способность природного газа;  $G_j$  и  $H_{uj}$  – расход и низшая теплотворные способности, входящих в состав синтез газа горючих веществ, в частности, водорода, оксида углерода и метана (расход см. в таблица 4 приложения Б);  $G_{npz}$  – расход природного газа, расходуемого ДВС;  $\eta$  - КПД преобразования углеводородного топлива в синтез газ.

### 3.3.2 Результаты испытаний при работе двигателя на холостом ходу

#### и их анализ

На рисунках 3.2 – 3.5 и в таблицах 1 - 3 приложения К приведены результаты испытаний ДВС при работе на режиме холостого хода (ХХ) при частоте вращения коленчатого вала  $850 \text{ мин}^{-1}$  и  $1380 \text{ мин}^{-1}$ . При этом, сравнительные испытания на режиме  $1380 \text{ мин}^{-1}$  выполнены при работе двигателя только на СГ.

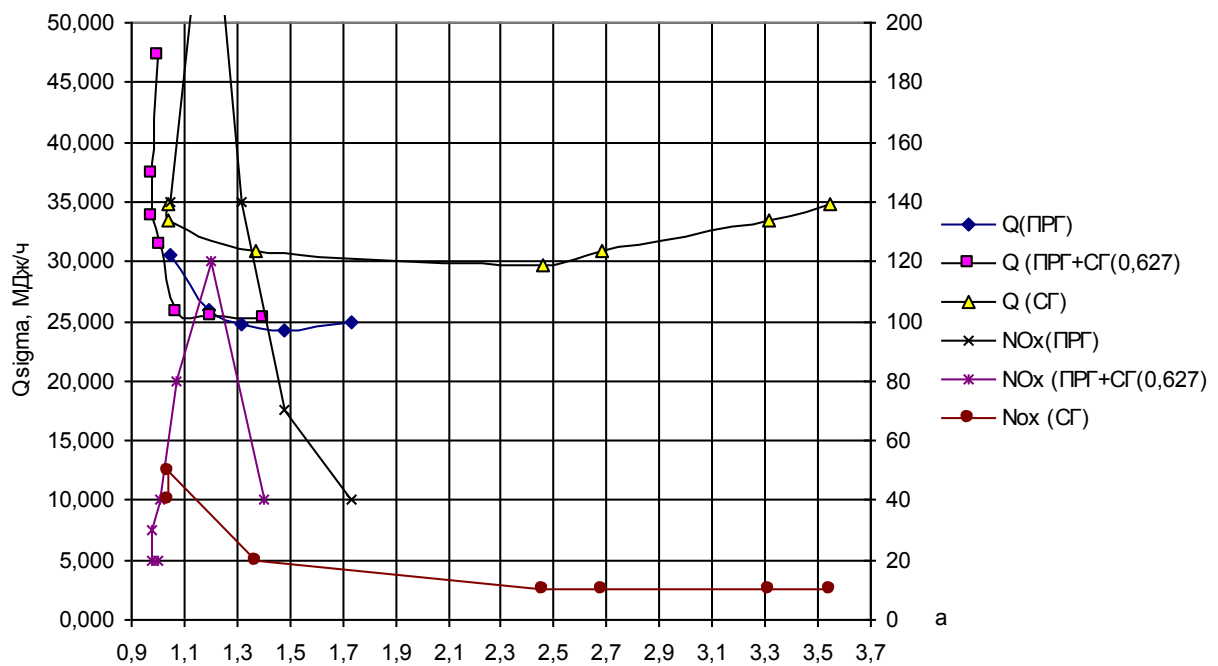


Рисунок 3.2 - Регулировочная характеристика  $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e = 0$

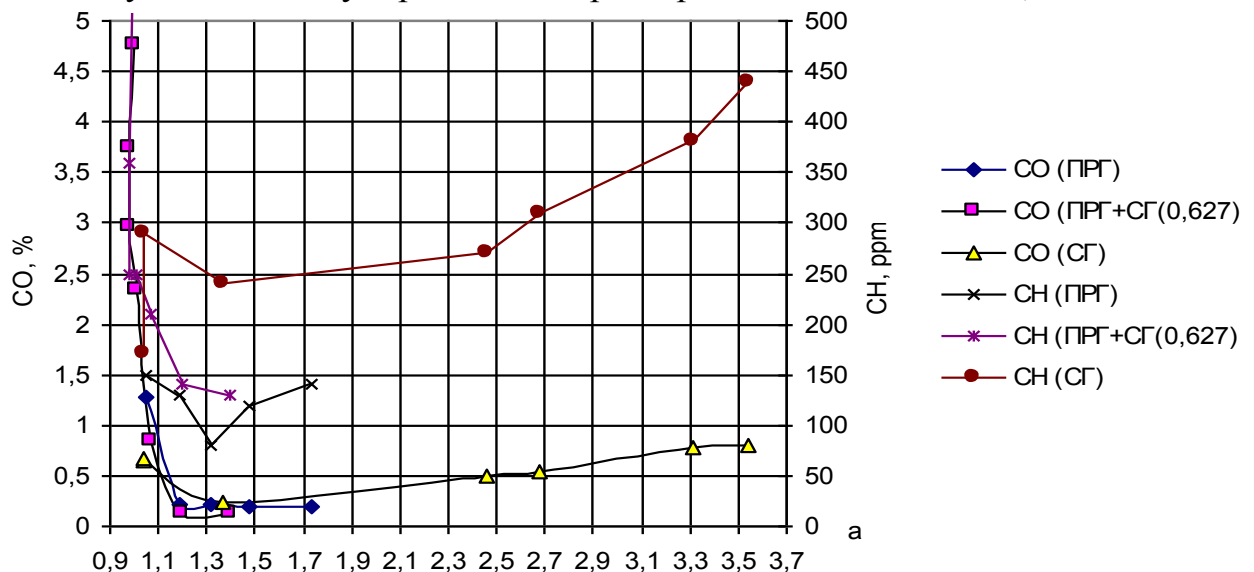


Рисунок 3.3 - Регулировочная характеристика  $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ ,  $Re = 0$

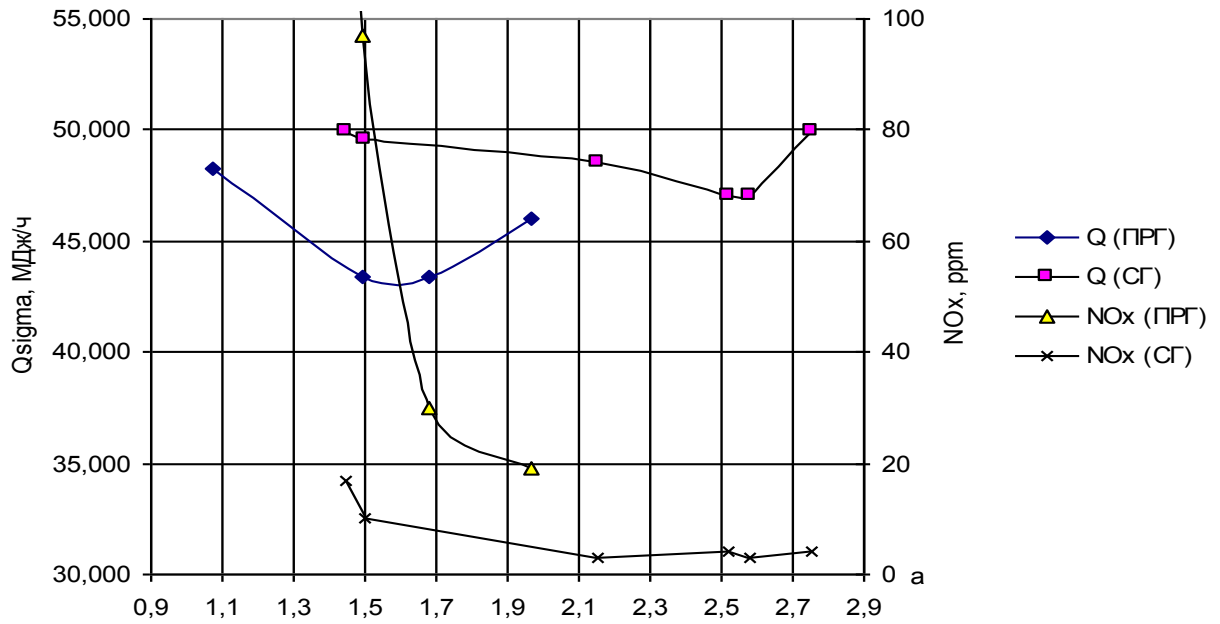


Рисунок 3.4 - Регулировочная характеристика  $n = 1380 \text{ мин}^{-1}$ ,  $Re = 0$

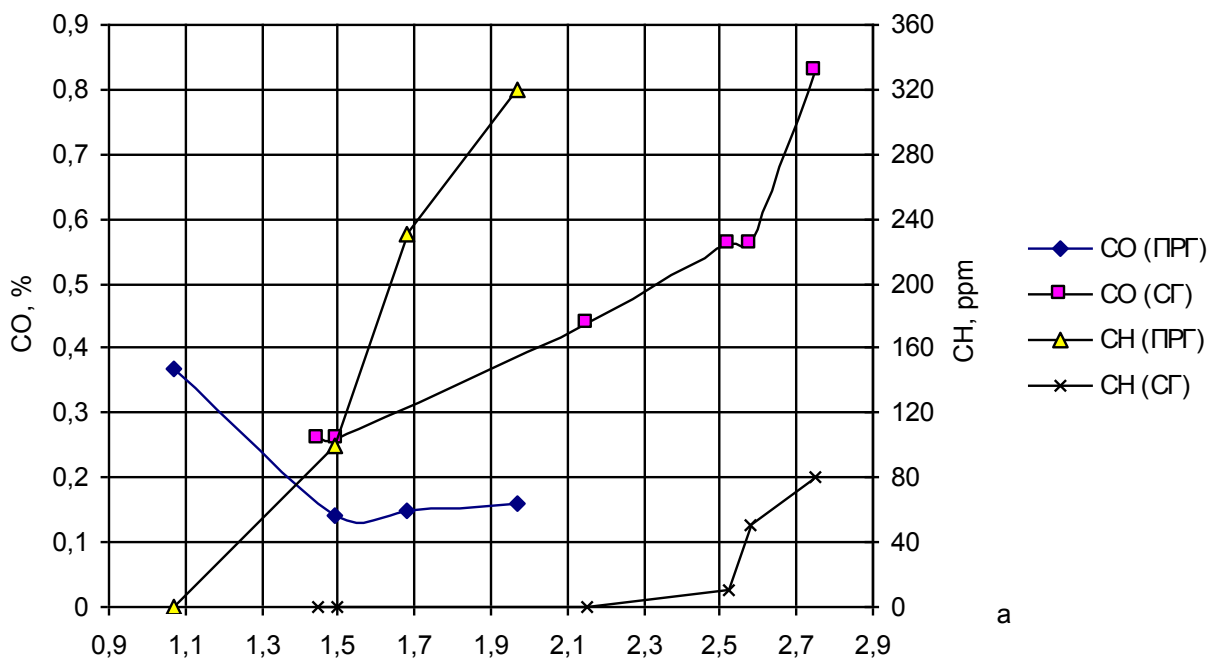


Рисунок 3.5 - Регулировочная характеристика  $n = 1380 \text{ мин}^{-1}$ ,  $Re = 0$

Сравнение результатов работы двигателя на природном газе и при использовании СГ по подведённой теплоте в систему ДВС-ГСГ  $Q_{sigma}$  показывает, что при использовании СГ в качестве добавки к основному топливу эффективность системы осталась примерно на том же уровне. Однако работа двигателя только на синтез газе сопровождается увеличением суммарного потребления тепла  $Q_{sigma}$  системой ДВС-ГСГ примерно на 21 % при  $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ . Данный результат может быть объяснен значительными относительными потерями тепла на конверсию природного газа, которые происходят в ГСГ, а также особенностями протекания рабочего процесса двигателя при питании его синтез газом (в первую очередь кинетикой горения смеси газов).

Как следует из графиков, при работе двигателя на данных режимах при его питании синтез газом происходит расширение области устойчивой работы двигателя (по  $\lambda$ ) до значения  $\lambda = 2,5$ .

Результаты данных таблиц показывают также, что при работе двигателя на СГ с увеличением  $\lambda$  возрастают оптимальные УОЗ, достигая величины 60 гр.п.к.в. ( $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ ), что свидетельствует о замедлении процесса сгорания рабочей смеси в цилиндрах двигателя по мере ее обеднения.

Из рассмотрения данных таблицы 2 и 3, и рисунков 3.2 – 3.3 можно видеть, что при работе двигателя с применением СГ, объемное содержание токсичного компонента  $\text{NO}_x$  в отработавших газах ОГ, при одном и том же коэффициенте избытка воздуха  $\lambda$  снижается по мере возрастания доли СГ в топливе, что можно объяснить присутствием в СГ балластных компонентов (азот, вода), снижающих температуру горения. С обеднением смеси количество окислов азота снижается, достигая фактически нулевых значений при работе двигателя на СГ при  $\lambda = 2.0 - 2.1$ .

Рассмотрение графиков рисунка 3.4, 3.5 показывает, что при работе двигателя на синтез газе, происходит увеличение объёмного выброса нормируемого компонента  $\text{CO}$  в 1,5 -2 раза и увеличиваются по мере обеднения



рабочей смеси. Характер же изменения выбросов СН не однозначен и зависит от оборотов двигателя, например, его выбросы возросли (в 2,5 раза выше, чем базовый вариант) при всех составах рабочей смеси при  $n = 850 \text{ мин}^{-1}$ , а при более высоких скоростных режимах двигателя, также, как и при большей нагрузке, уровень выбросов СН остается значительно ниже, чем базовый, а на некоторых режимах регистрировался нулевым, вплоть до наступления пределов устойчивой работы ДВС. Данный факт, как можно предположить, объясняется более высокими температурами ОГ на выпуске, возрастающими с увеличением частоты вращения и нагрузки на двигатель, и требует специального изучения и объяснения.

### **3.3.3 Результаты испытаний при работе двигателя на режиме, характеризуемом частотой вращения $n=2185 \text{ мин}^{-1}$ и их анализ**

Результаты испытаний на данном режиме (при двух нагрузках) приведены на рисунках 3.6 – 3.9 и в таблице 1-3 приложения К. Отметим, что испытания на данных режимах проводились при работе двигателя на природном газе с добавками СГ ( $P_{\text{е}} = 0,19 \text{ МПа}$ ) и на питании его только СГ ( $P_{\text{е}} = 0,2 \text{ МПа}$ ).

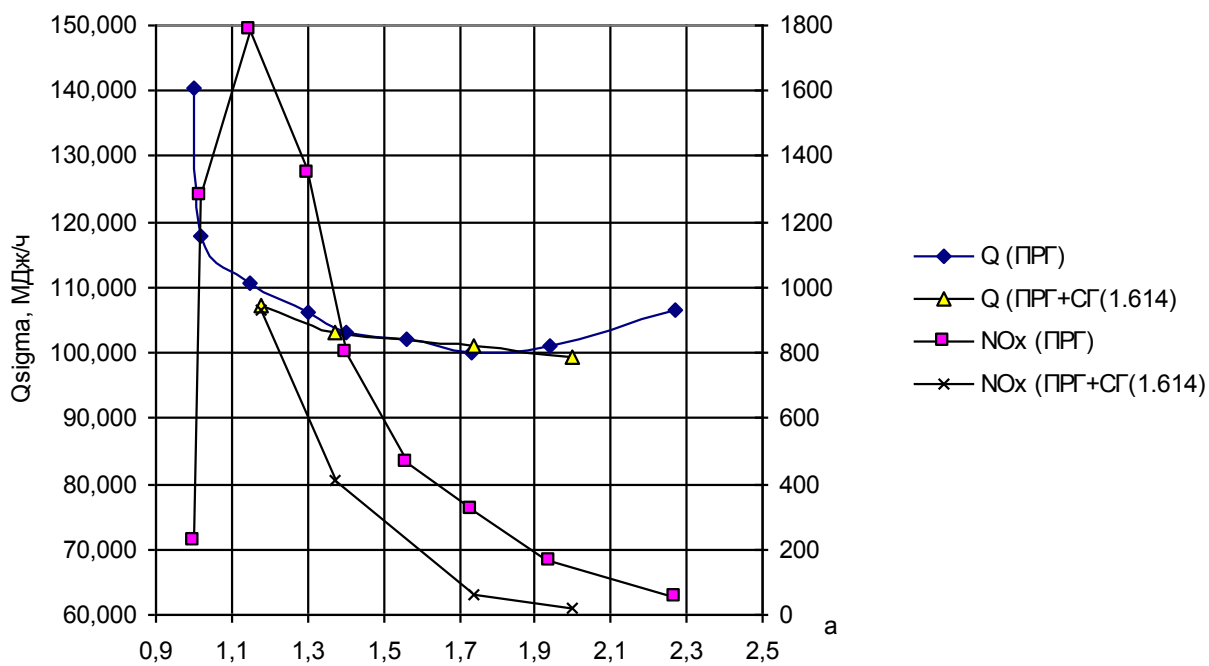


Рисунок 3.6 - Регулировочная характеристика  $n = 2185 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e = 0,19 \text{ МПа}$

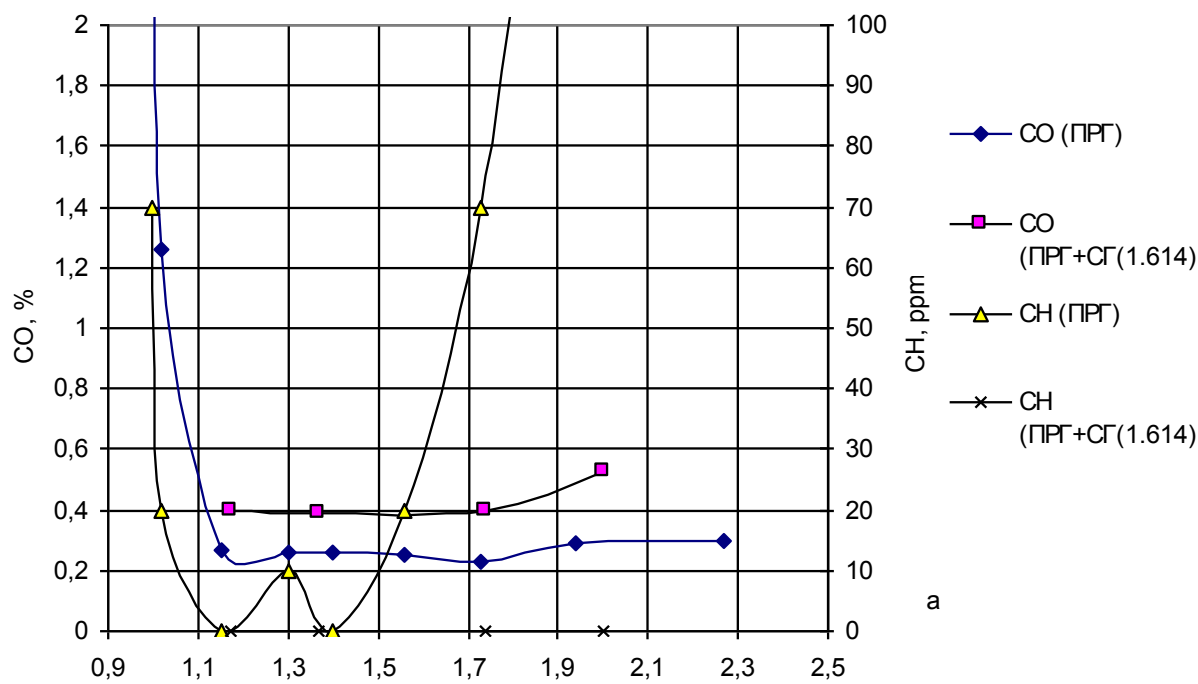


Рисунок 3.7 - Регулировочная характеристика  $n = 2185 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e = 0,19 \text{ МПа}$

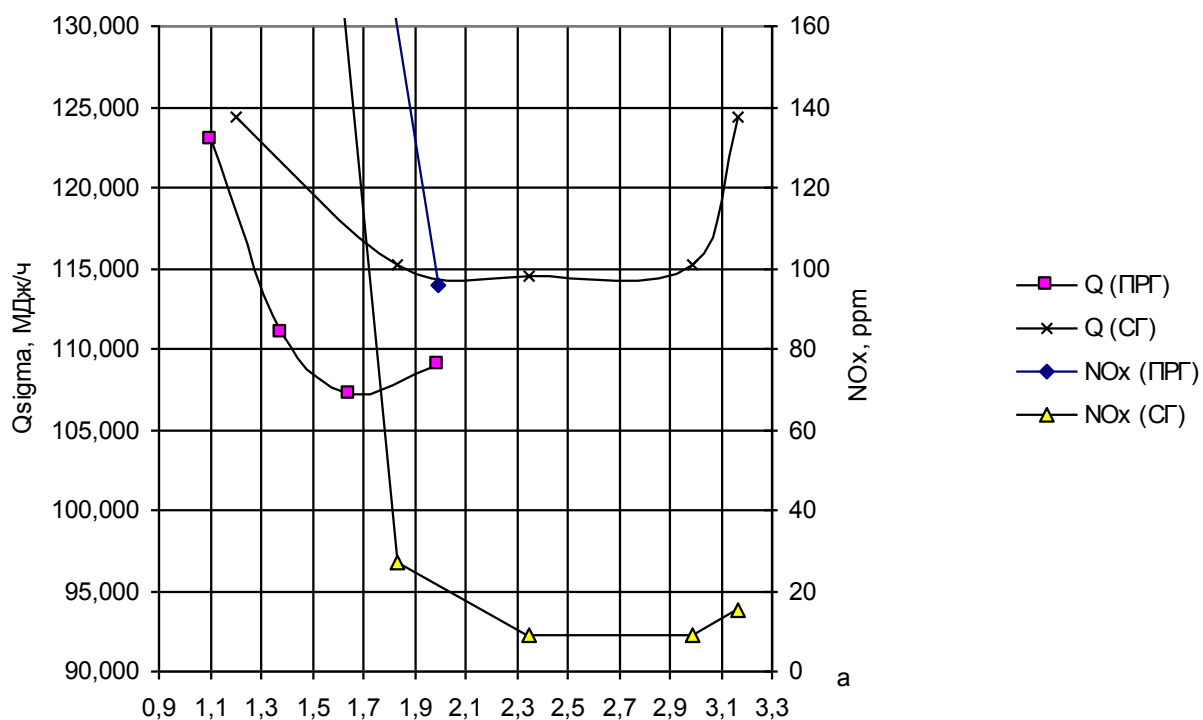


Рисунок 3.8 - Регулировочная характеристика  $n = 2185 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e = 0,2 \text{ МПа}$

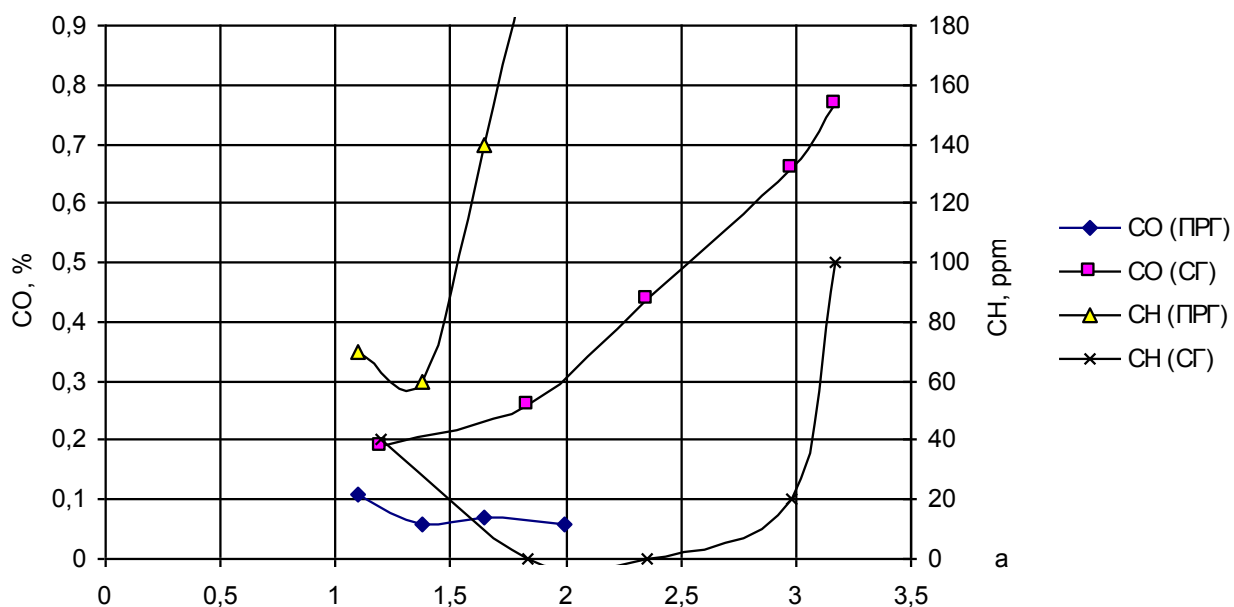


Рисунок 3.9 - Регулировочная характеристика  $n = 2185 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e = 0,2 \text{ МПа}$

Из рассмотрения графиков рисунка 3.6 можно видеть, что подведённая в цилиндры ДВС теплота  $Q_{sigma}$  при постоянном количестве подаваемого синтез газа монотонно снижается по мере возрастания  $\lambda$ , однако, на данном режиме

максимальная эффективность не была достигнута, тем не менее оценка полученной зависимости позволяет предположить о возможном снижении  $Q_{sigma}$  на 5-10% при данном режиме. При этом эффективность системы остается одинаковой во всем рассматриваемом диапазоне коэффициента избытка воздуха.

При работе двигателя только на синтез газе эффективность системы ДВС-ГСГ ухудшилась, что определяется возрастанием во всем исследованном диапазоне  $\lambda$  теплоты  $Q_{sigma}$  и, соответственно минимального его значения, примерно, на 6,5% по сравнению с базовым вариантом.

Рассмотрение графиков рисунка 3.6 и 3.8 показывает, что как при работе двигателя с добавкой СГ, так и при его работе на СГ наблюдается значительное снижение объёмных выбросов  $NO_x$ , как при определенном  $\lambda$ , так и по мере его возрастания, с достижением уровня выбросов 20 ppm в районе  $\lambda = 2.0$ .

Объёмные выбросы СН (рисунок 3.7 и 3.9) при применении СГ по сравнению с работой двигателя только на природном газе уменьшились до нулевого значения и начинают возрастать фактически при том же  $\lambda$ , когда наступает предел устойчивой работы, совпадающий с началом возрастания расхода топлива.

Объёмные выбросы СО возросли по сравнению с базовым вариантом в 1,5 – 4 раза. Причины данного факта, как можно предположить, заключаются в условиях протекания процесса сгорания в ДВС (например, присутствие паров воды может образовать местное не догорание топлива) и влиянием состава используемого топлива, т.е. природного газа и синтез газа. В связи с этим был проведен анализ состава ПГ, который приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Состав природного газа

Компонент	Содержание, %
Метан	98.27
Этан	0.1
Пропан	0.24
Бутан и т.д.	Следы
Азот	1.39

### 3.3.4 Результаты испытаний при работе двигателя на режиме, характеризуемом частотой вращения $n = 3277 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузкой $P_e = 0,33 \text{ МПа}$ и их анализ

Регулировочные характеристики, полученные на данном режиме работы двигателя, представлены на рисунках 3.10-3.11 и в таблице 1-3 приложения К. Исследования проводились только с добавкой синтез газа.

Из рассмотрения графиков рисунка 3.10 можно видеть, что применение добавок СГ приводит к сохранению подведённой в ДВС с топливом теплоты на уровне, примерно,  $Q_{sigma} = 206 \text{ МДж}$ , что равно минимально достигаемому на природном газе. При этом эффективное значение  $\lambda$  смещается в бедную сторону до значений, примерно, равных  $\lambda = 2,0$ . При этом уровень выбросов  $\text{NO}_x$  составляет 25 ppm. Дальнейшее увеличение расхода СГ позволит расширить предел обеднения с одновременным повышением экономичности.

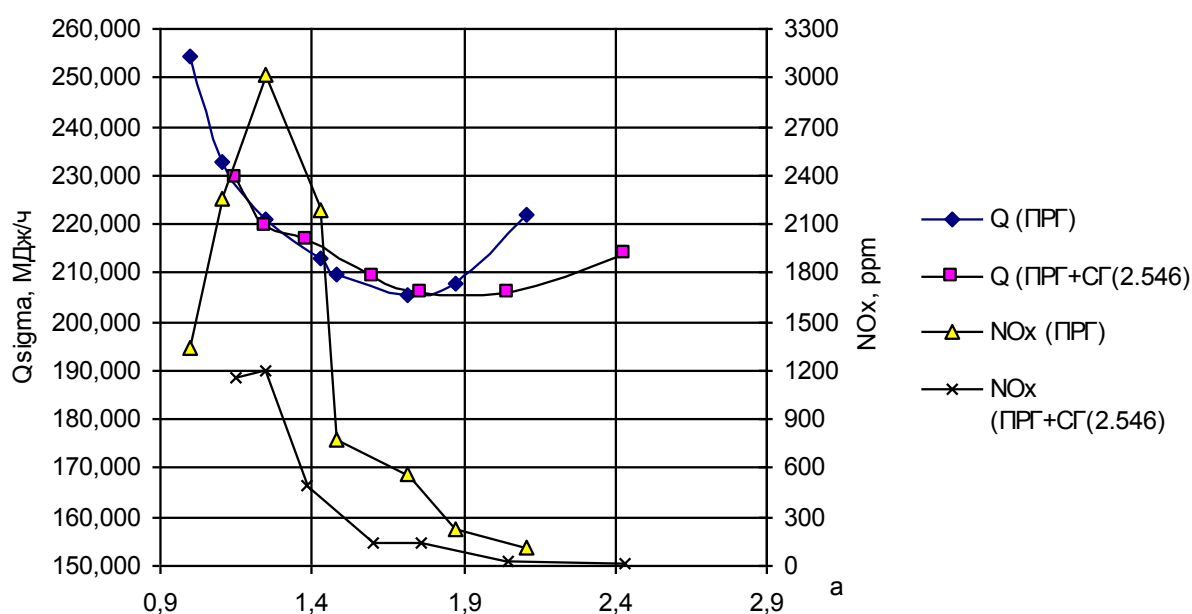


Рисунок 3.10 - Регулировочная характеристика  $n = 3277 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e = 0,33 \text{ МПа}$

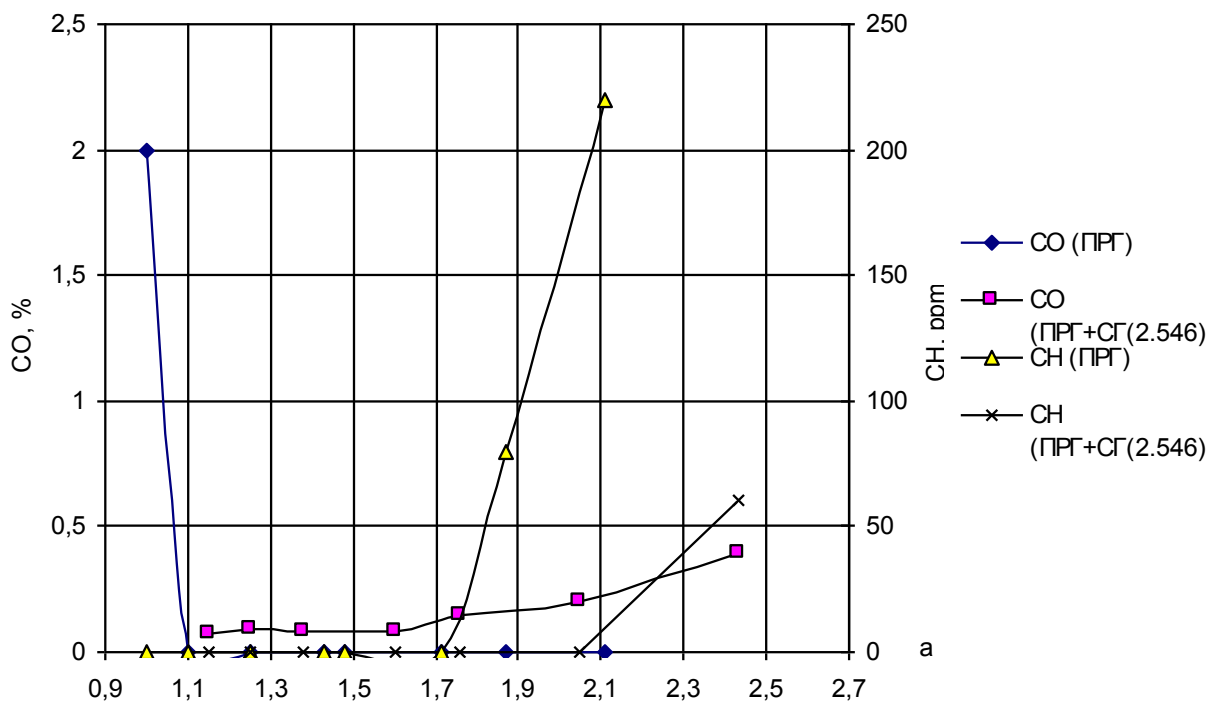


Рисунок 3.11 - Регулировочная характеристика  $n = 3277 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e = 0,33 \text{ МПа}$

Рассмотрение графиков изменения СН показывает, что на данном режиме во всей области  $\lambda = 1,1-2,05$  выбросы углеводородов практически отсутствуют. С увеличением  $\lambda > 2,1$  происходит резкое увеличение выбросов углеводородов, что связано с возникновением пропусков зажигания вследствие обеднения смеси в цилиндрах ДВС.

Результаты рисунка 3.11 показывают возрастание объемных выбросов СО при изменении коэффициента избытка воздуха. Его уровень возрос до величины 0,08% по сравнению с базовым (регистрировался равным нулю) и монотонно возрастает с обеднением. Характер данной зависимости объясняется понижением температуры сгорания, особенно с обеднением смеси (что подтверждается снижением  $\text{NO}_x$ ), что определяет не догорание топлива в цилиндре ДВС. Сравнение данного режима двигателя с режимами при меньшей нагрузке также показывает, что величина объемных выбросов СО значительно меньше, что связано с более высоким уровнем температур рабочего тела в процессе сгорания.

Таким образом, результаты испытания подтвердили возможность

устойчивой работы двигателя на обедненной бензино-воздушной топливной смеси с добавками синтез-газа. При этом при работе двигателя с добавками синтез-газа в рабочую смесь было достигнуто снижение расхода топлива (соответственно, снижение эмиссии парникового газа) на 42% на холостом ходу и на 24% - при работе в рабочем режиме:  $P_e=0,2$  МПа и  $n=2185$  мин<sup>-1</sup>. Одновременно на холостом ходу при добавках синтез-газа было отмечено значительное снижение уровня выбросов СН и NO<sub>x</sub>. При этом содержание СО в выбросах не превышало 0,2 об.%. Аналогичные результаты были получены при проведении краткосрочных испытаний в НАМИ (г.Москва) двигателя М406 на режиме, соответствующем движению автомобиля со скоростью 50 км/час.

Одновременно со снижением уровня токсичности наблюдается примерно на 20% уменьшение расхода топлива. Таким образом, проведенные эксперименты надежно доказали, что применение синтез-газа в качестве добавки к жидкому или газовому топливу, используемому в ДВС с принудительным воспламенением, обеспечивает значительное снижение концентраций оксидов углерода и азота в выхлопных газах двигателя.

Наряду с этим, использование синтез-газа обеспечивает общее снижение на 20-25% расхода углеводородного топлива в условиях городского цикла за счет обеспечения устойчивой работы двигателя при использовании обедненных топливных смесей.

Отмеченные выше преимущества использования синтез-газа в качестве частично замещающего топлива в искровых ДВС подтверждаются литературными данными как для двигателей на природном газе [71, 72], так и на бензине [73]. Найти данные об использовании синтез-газа в ДВС на этаноле не удалось, хотя пример использования обедненных смесей этанола с водородом [74] позволяет говорить о проявлении тех же тенденций, что отмечены для ДВС, использующих в качестве топлива синтез-газ в смеси с бензином или природным газом: расширяется диапазон обеднения топливной

смеси, достигается резкое сокращение эмиссии токсичных компонентов, уменьшается расход топлива и эмиссия парникового газа.



## Заключение

На основании результатов выполненных работ можно сделать следующие выводы:

1. Определены в условиях моторного стенда зависимости выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами двигателя с искровым зажиганием работающего на бензине, пропан-бутане и сжатом природном газе, а именно в диапазоне мощностей от 10 до 35 кВт удельные средневзвешенные выбросы токсичных компонентов до нейтрализатора примерно остаются одинаковыми независимо от типа используемого топлива.

2. Результаты экспериментальных работ позволяют сделать вывод о возможности выполнения действующих норм токсичности двигателем ЗМЗ-409061.10 попадающего под действие требований, норм и т.д. ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения» и ГОСТ ISO 8178-4-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах».

3. Предложен прогрессивный метод дальнейшего совершенствования рабочего процесса ДВС для обеспечения перспективных требований норм экологичности Stege, основанный на использовании активирующих процесс сгорания добавках в топливно-воздушную смесь.

## Список использованных источников

1. Золотницкий В.А. Новые газовые системы автомобилей. – М.: «Издательский дом Третий Рим», 2003.
2. Лютко В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: МАДИ, 2000 – 2 т.
3. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. Изд. 2-е – перераб. – М.: Машиностроение. – 1981.
4. Хитрин Л.И. Физика горения и взрыва / Л.И. Хитрин; М.: - 1955.
5. Асмус Т.У. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т.У. Асмус, К. Бргннакке и др.; под ред. Д.Хиллиарада, Дж.С. Спрингера; перевод с англ. Васильева; под ред. А.В. Кострова. – М.: Машиностроение, 1988.
6. ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения».
7. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени; перевод с англ. Ю.Ф. Дитикина. – Машиностроение. – 1981.
8. Wentworth J.T. SAE. Combust., Sci. Technol., 4, 970100. – 1970.
9. Simon D.M. Fourth Symposium (International) on combustion / Simon D.M., Belles F.E., Spakowski A.E.; p. 126-138, Baltimore. - 1953. См. 4-ый симпозиум (международный) по вопросам горения и детонационных волн: оборонгаз с. 100. – 1958.
10. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов / Я.Б. Зельдович; М.: АН СССР. – 1954.
11. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие / А.Р. Кульчицкий; Владимирский гос. университет. Владимир, 2000.

12. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени; перевод с англ. Ю.Ф. Дитикина. – Машиностроение. – 1981.
13. Основы горения углеводородных топлив; перевод с англ. под ред. Л.И. Хитрина и А.И. Попова. – Изд. иностр. литературы. – 1960.
14. Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Book Company, 1994.
15. The Clean Fuels Report, J.E. Sinor Consultants Inc., Niwot, Colorado, June 1992.
16. ГОСТ 14846-81 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний.
17. ГОСТ ISO 8178-1-2013 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 1. Измерение выбросов газов и частиц на испытательных стендах.
18. ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения».
19. ГОСТ ISO 8178-4-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах».
20. Ф.В. Смаль, Е.Е. Арсенов, Перспективные топлива для автомобилей. М., «Транспорт», 1979
21. Русаков М.М., Бортников Л.Н., Беляков Г.П., Афанасьев А.Н., Олехнович В.А., Павлов Д.А. Использование водорода для улучшения показателей автомобильных ДВС с искровым зажиганием // Международный симпозиум по водородной энергетике 1-2 ноября, Москва, 2005. С.131-133.
22. Афанасьев А.Н., Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М., Кириллов В.А., Кузьмин В.А., Смирнов Е.И. Использование добавок водорода и

- водородосодержащих газов в ДВС // II Международный симпозиум по водородной энергетике, 1-2 ноября, Москва, 2007. С.113-115.
23. Бризицкий О.Ф. и др. Разработка компактных устройств для получения синтез-газа из углеводородного топлива на борту автомобиля в целях повышения топливной экономичности и улучшения экологических характеристик автомобиля. Водородная энергетика и транспорт. Методы получения водорода. Science Technical Center «ТАТА», Саров – 2004.
24. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справ. изд. / Д.Ю. Гамбург, Н.Ф., В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин [и др.]; под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. -М.: Химия, 1986.- 672 с.
25. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей / А.И. Мищенко.- Киев: Наукова думка, 1984.- 143 с.
26. Шароглазов Б.А. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов: учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в ДВС / Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; под ред. засл. деят. науки РФ, профессора, доктора техн. наук Б.А. Шароглазова. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. С. 36-37.
27. Хмыров В.И. Водородный двигатель / В.И. Хмыров, Б.Е. Лавров Б.Е. - Алма-Ата: Наука, 1981. -108 с.
28. Малышенко С.П. Водородный автомобиль в России / С.П.Малышенко // Энергия.- 2003.- № 7.- С. 33-39.
29. Автомобильные двигатели /Архангельский В.М., Вихерт М.М., Войнов А.Н. [и др]; под ред. проф. М.С.Ховаха - М.: Машинстроение, 1977.- 496 с.
30. Месяц Г.А. Водородная энергетика и топливные элементы / Г.А. Месяц, М.Д. Прохоров // Вестник Российской академии наук.- 2004.-Т. 74, № 7. - С. 579-597.

31. Keith D., Farrell A. Rethinking Hydrogen Gas // Science. -2003. -Vol. 301. № 18. -p. 315-316.
32. Verhelst S. Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines / S. Verhelst, T. Wallner. – Amsterdam (Niderlandi), 2009.- 133 p.- Preprint Elsevier Science Publishing Company, Inc. August 19, 2009. 133 p.
33. Двигатели внутреннего сгорания: учеб. для ВУЗов. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов/ В.Н Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина [и др.]. -Изд. 3-е. перераб.- М.: Высш. шк. , 2007. - 479 с.
34. Водородный транспорт [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.unusavto.ru/ vodorodnyjtransport.htm](http://www.unusavto.ru/vodorodnyjtransport.htm) (дата обращения: 21.01.2013).
35. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород / Р.З. Кавтарадзе.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.- 238 с.
36. Коноплев В.Н. Научные основы проектирования автотранспортных средств, работающих на газомоторных топливах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03/ Коноплев Владимир Николаевич . –М., 2008. -45 с.
37. Перспективы использования синтез-газа в двигателях внутреннего сгорания: отчет о НИР по гранту РФФИ № 06.00310а / Русаков М.М., Афанасьев А.Н., Бортников Л.Н., Кузьмин В.А. - Тольятти: Тольяттинский госуниверситет-Институт катализа СО РАН, 2007. - 52 с.
38. Терещук В.С. Разработка научных основ технологии получения и промышленного использования водородосодержащих композитов на основе активных энергоаккумулирующих веществ: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / Терещук Валерий Сергеевич.- М., 2009.
39. Verhelst S. Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines / S. Verhelst, T. Wallner. – Amsterdam (Niderlandi), 2009.- 133 p.- Preprint Elsevier Science Publishing Company, Inc. August 19, 2009. 133 p.
40. Двигатели внутреннего сгорания: системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник по специальности «Двигатели

внутреннего сгорания» / С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин [и др.]; под общ.ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова.-3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. - 456 с

41. Черепов О.Д. Снижение токсичности отработавших газов карбюраторных двигателей путем стабилизации смесеобразования в условиях эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03; 05.04.02 / Черепов Олег Дмитриевич.- Барнаул, 2005.- 224 С.
42. Синтезгаз. Свойства Газа Брауна. [Электронный ресурс] / Синтезгаз. Альтернативная энергия.-2009.- Режим доступа: [http://sintezgaz.org.ua/1\\_articles/122/svoistva-gaza-brauna](http://sintezgaz.org.ua/1_articles/122/svoistva-gaza-brauna)
43. Синтезгаз. Что такое газ Брауна. [Электронный ресурс] / Синтезгаз. Альтернативная энергия.-2009.- Режим доступа: [http://sintezgaz.org.ua/1\\_articles/127/chto-takoe-gaz-brauna](http://sintezgaz.org.ua/1_articles/127/chto-takoe-gaz-brauna)
44. Johz F. Cassidy. Emissions and total energy consumption of a multicylinder piston engine running on gasoline and a hydrogen-gasoline mixture. Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1977.
45. Mike Allen. Water-Powered Cars: Hydrogen Electrolyzer Mod Can't Up MPG. Popular Mechanics, August 7, 2008
46. N.N. Mustafi, Y.C. Miraglia, R.R. Raine, P.K. Bansal, S.T. Elder, Spark-ignition engine performance with 'Powergas' fuel (mixture of CO/H<sub>2</sub>): A comparison with gasoline and natural gas. Fuel, V. 85, p. 1605-1612, 2006
47. D. Andreatta, R.W. Dibble, An experimental study of air-reformed natural gas in spark-ignited engines. SAE Technical Paper Series No. 960852, 1996
48. C. Sogaard, J. Schramm, T.K. Jensen, Reduction of UHC-emissions from natural gas fired SI-engine – production and application of steam reforming natural gas. SAE Technical Paper Series No. 2000-01-2823, 2000
49. J.E. Kirwan, A.A. Quader, M.J. Grieve, Advanced engine management using on-board gasoline partial oxidation reforming for meeting super-ULEV

- (SULEV) emissions standards. SAE Technical Paper Series No. 1999-01-2927, 1999
50. А. Павлов, А.П. Шайкин, Н.А. Гатауллин, И.В. Нефёдов, Р.Х. Хафизов Ю.Ф. Гортышов, В.М. Гуреев Влияние добавок водорода на экономические и экологические показатели газового двигателя КАМАЗ – 820.53-260 // II Международный симпозиум по водородной энергетике, 1-2 ноября, Москва, 2007. С. 136-138.
51. Афанасьев А.Н., Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М., Кириллов В.А., Кузьмин В.А., Смирнов Е.И. Использование добавок водорода и водородосодержащих газов в ДВС // II Международный симпозиум по водородной энергетике, 1-2 ноября, Москва, 2007. С.113-115.
52. Анализ работы поршневого двигателя на водороде / И.Л. Варшавский, А.И. Мищенко, А.А. Макаров, Г.Б. Талда // Известия ВУЗов. Машиностроение.- 1977.- №10.- С.110-114.
53. Аннушкин Ю.М. Эффективность горения водородокеросинового топлива в прямоточном канале / Ю.М. Аннушкин // Физика горения и взрыва. - 1985.- Т. 21, №3. - С. 30-32.
54. Асланян Г.С. Проблематичность становления водородной энергетики / Г.С. Асланян, Б.Ф. Реутова Б.Ф. // Теплотехника.- 2006.- № 4.- С. 66-73.
55. Бузуков А.А. Исследование процессов воспламенения и сгорания водородовоздушной смеси на установке быстрого сжатия / Физика горения и взрыва // Физика горения и взрыва. -1999. -Т. 35, №6. -С. 3-14.
56. Бунев В.А. О механизме промотирования и ингибирования окисления богатых воздушных смесей водорода оксидами азота NO NO<sub>2</sub> при адиабатическом воспламенении / В.А. Бунев // Физика горения и взрыва. -2011. - Т.47, №1. -С. 22-29.
57. Apostolescu N., Chiriac R. A. Study of Combustion of Hydrogen-Enriched Gasoline in Spark Ignition Engine // Automotive Engineers. 1996. p. 25-36.

58. CHEC HFI водородная система инъекции [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chechfi.ca/sohfitech.htm> (дата обращения: 20.12.2007).
59. Gasoline additive for direct injection gasoline engine / Katsuhiko Hagji, Masaki Nagao, Jin Akimoto, Masahiro Yosida: пат. 20010020345 US США. № 09/826282; заявл. 04.04.2001; опубл. 13.09.2001.
60. Hacoheh J., Pinhasi G., Puterman Y. Driving Cycle Simulation of a Vehicle Motored a SI Engine Fueled with H<sub>2</sub> – enriched Gasolin // Int. J. Hydrogen Energy. - 1991. -Vol.16, No.10. -p. 695-702.
61. HFI System [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chechfi.ca/sohfitech.htm> (дата обращения 21.10.2006).
62. Jordon Wolfgang. Beeinflussung der ottomotorischen Verbrennung durch Zusciz von Wasserstoff zum Kraftstoff // MTZ.- 1979.- №2.- p. 75-78.
63. Kido H. Improvement of Lean Hydrocarbon Mixtures Combustion Performance by Hydrogen Addition and Its Mechanisms: International Symposium COMODIA 94 (1991). Faculty of Engineering Kyushu University / H. Kido, S. Huang, K. Tanoue, T. Nitta. -Hakozaki, Higash-ku, Fukuoka 812, Japan. p. 119-124.
64. Konnov A.A. Refnement of the kinetic mechanism of hydrogen combustion / A.A. Konnov // Химическая физика. -2004.-Т.23, №8. - С.5-18.
65. Lipatnikov A.N. A study of the effects of pressure-driven transport on developing turbulent flame structure and propagation // Combustion Theory and Modeling. -2004. -Т. 8, №2. -p.211-225.
66. Mohammadi A. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine / A. Mohammadi, M. Shioji, Y. Nakai, W. Ishikura, E. Tabo // International Journal of Hydrogen Energy. -2007. - №32(2). -p.296-304.



67. Mustafi N.N. Spark-ignition engine performance with 'Powergas' fuel (mixture of CO/H<sub>2</sub>): A comparison with gasoline and natural gas / N.N. Mustafi,
68. Y.C. Miraglia, R.R. Raine, P.K. Bansal, S.T. Elder // Fuel. -2006.- V. 85. - p. 1605-1612.
69. Schwaderlapp M. Variable Compression Ratio-A Design Solution for Fuel Economy Concepts / M. Schwaderlapp, K. Habermann, K. Yapici // SAE Technical Paper Series. - 2002.- № 2002-01-1103.- P.11-18.
70. Verhelst S. Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines / S. Verhelst, T. Wallner. – Amsterdam (Niderlandi), 2009.- 133 p.- Preprint Elsevier Science Publishing Company, Inc. August 19, 2009. 133 p.

## Приложение А

(обязательное)

### Спецификация комплектации двигателя ЗМЗ-409

№	Наименование	Номенклатурный номер	Кол-во	Примечание
1	Двигатель внутреннего сгорания с системой впуска	ЗМЗ 409061 №409061F004836	1 шт.	Комплектация двигателя «бензин»
2	Система выпуска	МК20007.12.00.00	1 шт.	
3	Нейтрализатор	Экомаш-НК ЭМ 063.1206010-05	2 шт.	

## Приложение Б

(обязательное)

### Спецификация ЭСУД

№	Наименование	Обозначение	Кол-во	Примечание
1	Дроссельный модуль с электроприводом дроссельной заслони и ДПД	40904,1148090 DV-E-5, Bosch 0 280 750 151	1	Привод – двигатель постоянного тока напряжением бортовой сети.
2	ДПКВ Датчик синхронизации КВ индуктивного типа	40904.3847010 DG-6-K, Bosch 0 261 210 302	1	Формирует электрический сигнал при взаимодействии магнитного поля датчика с зубчатым диском шкива коленчатого вала согласованной с разработчиком СУД конструкции. Параметры диска: количество зубьев 60-2, Ø174 мм, высота зуба 7 мм. Взаимная ориентация зубчатого диска и датчика: момент прохождения осью датчика сбега двадцатого зуба диска соответствует нахождению поршня первого цилиндра в верхней мертвой точке. Отсчет номера зуба – от пропуска в направлении, противоположном вращению коленчатого вала двигателя. Диапазон функционирования датчика: скорости вращения диска 20...7000 min-1, воздушный зазор между керном датчика и поверхностью зуба диска – 0,3...1,5 мм. Минимальная амплитуда выходного сигнала с датчика при оборотах коленчатого вала (20+1) мин-1 и максимальном

				зазоре (1,5+0,05) мм должна быть не менее 0,21В. Максимальная амплитуда выходного сигнала с датчика при оборотах коленчатого вала (6000...30) мин-1 и минимальном зазоре (0,3+0,03) мм должна быть (100...120)В. Измерение выходного напряжения должно производиться на активной нагрузке 10 кОм.
3	ДПРВ Датчик фазы Hall	40904.3847000 -01 PG-3.8, Bosch 0 232 103 097	1	Формирует сигнал при взаимодействии магнитного поля датчика с отметчиком установленном на распределительном вале. Момент начала формирования сигнала датчиком фазы, при наличии совпадения сбеге первого зуба диска 60-2 с осью датчика синхронизации, свидетельствует о начале такта сжатия в первом цилиндре. Диапазон функционирования датчика: скорости вращения распределительного вала двигателя 10...3500 min-1, воздушный зазор между керном датчика и поверхностью отметчика – 0,1...1,9 мм.
4	ДТОЖ Датчик температуры ОЖ NTC-типа	40904.3828000 TF-W, Bosch 0 280 130 093	1	Рабочий диапазон температур - от минус 40 °С до плюс 140 °С.
5	ДДТВ Датчик давления и температуры воздуха во впускном коллекторе	40905.3829010 DS-S3-TF, Bosch 0 261 230 217	1	Датчик давления 10...115 кПа Датчика температуры NTC-типа -40...+130 °С Напряжение питания – стабилизированное, 5В

				<p>Передаточная функция датчика давления</p> $U_A = (C_1 \cdot p_{abs} + C_0) \cdot U_S$ <p>Где: <math>U_A</math> = напряжение выходного сигнала, В;  <math>U_S</math> = напряжение питания, В;  <math>p_{abs}</math> = абсолютное давление, кПа;  <math>C_0 = -0,1/105</math>;  <math>C_1 = 0,85/105</math> кПа-1.</p>
6	Датчик Детонации	40904.3855000 KS-4-S Bosch 0 261 231 176	1	<p>Чувствительность датчика на частотах от 0 до 12 кГц находится в пределах 24-36 мВ/г; от 12 до 16 кГц в пределах 20-45 мВ/г; от 16 до 22 кГц в пределах 28-45 мВ/г. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики не более <math>\pm 10\%</math> при частоте 5 кГц и ускорении от 20 до 100 м/с<sup>2</sup>. Электрическая емкость 1150 <math>\pm 200</math> пФ. Резонансная частота датчика более 30 кГц.</p>
7	Датчик кислорода (лямбда-зонд), четырехпроводной, с управляемым электроподогревом :	используется датчик кислорода типа ДК 889 аналог 25.368889 ф. Delphi	2	<p>Основной лямбда-зонд в системе регулирования топливоподачи в области стехиометрического состава топливоздушной смеси, размещение до катализатора, на приемной трубе выхлопной системы автомобиля. Предназначен для определения блоком управления состава смеси перед катализатором. Дополнительный (диагностический) лямбда-зонд во втором контуре регулирования состава</p>

				<p>топливовоздушной смеси и выполнения требований бортовой диагностики, размещение - после катализатора. Предназначен для определения блоком управления состава смеси после нейтрализатора и оценки эффективности функционирования нейтрализатора.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- номинальное напряжение питания датчика – 12 В.</li> <li>- номинальный ток цепи нагревателя – (1,35±0,2) А.</li> <li>- время отклика по нарастанию от 300 до 600 мВ и спаду от 600 до 300 мВ должно быть не более 125 мс.</li> <li>- сопротивление цепи нагревателя в холодном состоянии при температуре окружающей среды (20±3) °С должно быть (9±3) Ом.</li> </ul>
8	Датчик аварийного давления масла	6002.3829	1	<p>12В, 5А Давление размыкания/замыкания 0,6±0,2 кгс/см<sup>2</sup></p>
9	Топливопровод распределительный	40905.1100010 KSZ-S, Bosch 0 280 151 256	1	<p>Топливная магистраль имеет на входе штуцер для быстросъемного соединения, вдоль магистрали имеются отверстия для установки форсунок и ниппель для определения давления топлива. Рабочее давление 390 кПа.</p>
9. 1	Бензиновые форсунки (электромагнитные, двухфакельные)	40904.1132010 EV14EL, Bosch 0 280 158 237	4	<p>Угол между осями двух направлений факела распыла 22° ± 4°. Статическая производительность форсунки при перепаде</p>

				<p>давления рабочей жидкости 300 кПа и номинальном напряжении питания должна быть 172 г/мин. Данные по п-гептану (плотность: 0.684 г/см<sup>3</sup> ± 0.002 г/см<sup>3</sup> вязкость: 0.61 мм<sup>2</sup>/с ± 0.01 мм<sup>2</sup>/с). Динамическая производительность форсунки при перепаде давления рабочей жидкости 300 кПа, номинальном напряжении питания и длительности управляющих импульсов тока 2,5 мс должна быть равна 5.0 г/1000 циклов.</p>
10	Катушка зажигания (индивидуальные, трансформаторного типа, без коммутатора)	«СОАТЭ» 407.3705000 аналог BWBSK 4075 (Корея) 40904.3705000 -01	4	<p>Время нарастания тока в первичной цепи катушки до уровня (7 ± 0,3) А при работе в составе системы управления и напряжении питания 14 В составляет (2,6...2,7) мс. Сопротивление соединительных проводов при определении времени накопления энергии в первичной обмотке (200±10) мОм. Развиваемое вторичное напряжение на нагрузке Сш=35 пФ, Rш=10 МОм при токе разрыва 7 А напряжении питания системы управления 14 В составляет от 30 кВ до 35 кВ. При этом скорость нарастания вторичного напряжения в интервале (10...90)% от развиваемого вторичного напряжения 900 В/мкс на указанной нагрузке.</p>
11	Свеча зажигания	Brisk DR17YC	4	<p>Количество боковых электродов 1 Зазор между электродами</p>

				0,75 мм. Калильное число 17 Вид топлива бензин При выборе учесть уменьшение свечного зазора в процессе эксплуатации.
12	Датчик NOx (12В) Опция	Smart NOx Sensor/12V		Связь датчика NOx с M12M по протоколу J1939. Измерение альфа в диапазоне 0.5...5. Поддержание заданного состава смеси за счет ОС и расчетной модели. Измерение NOx в диапазоне 0...1500 ppm.
13	Термистор Опция	АБИТ. 857180.020		Термистор устанавливается после нейтрализатора.
14	Комплект жгутов проводов	АБИТ	1	КД на жгут изготавливает Исполнитель по эскизной документации Заказчика
15	Блок управления	M12M	1	или модификация блока M12M
16	Педаля	Curtis FP-FCV-0001	1	ДПП потенциометрического типа встроен в педаль газа (0...5 В). Сигнал с педали поступает в систему управления Curtis
17	Датчик скорости	Выключатель индуктивный бесконтактный IBS WC31A8-31N-1,5-S4-1	2	Напряжение питания 10...30 В DC Рабочий ток $\leq 250$ мА Частота переключения 600Гц Датчики скорости встроены в передний и задний гидромоторы. Сигналы с датчиков поступают в систему управления Curtis
18	Реле стартера	411.3787-02 «Энергомаш»	1	Выполняет функции реле блокировки стартера или пускового реле 4 контактное электромагнитное реле 12В, 70А
19	Главное реле	40.3787 «Энергомаш»	1	5 контактное электромагнитное реле 12В, 20А



20	Ключ зажигания «Кл.15»	21230-3704010 «ДААЗ»	1	Тумблер, сухие контакты.
----	---------------------------	-------------------------	---	--------------------------

## Приложение В

(обязательное)

### Спецификация систем питания газом (LPG/CNG)

№	Наименование	Обозначение	Кол-во	Примечание
1	Переключатель-индикатор вида топлива газ-бензин электронный	Lovato X553001 TP, 1110011	1	Имеет кнопку, 7 светодиодных индикаторов и внутренний зуммер.
2	Газовый редуктор-испаритель LPG	Lovato RGJ HP 536771000	1	$P_{gas} = 1.0 \text{ Bar}$ (220кВт) В состав редуктора входит электромагнитный клапан и датчик температуры редуктора
3	Датчик температуры редуктора Easy fast	Lovato NTC 421053	1	Входит в состав редуктора Lovato RGJ HP
4	Запорный клапан на газовом баллоне LPG	Tomasetto AT02	2	Мультиклапан с электромагнитным запорным клапаном и отдельными предохранительными клапанами: защита от превышения внутреннего давления и высокой температуры (пожарный клапан)
5	Датчик уровня газа в баллоне LPG	АЕВ 1050	2	Устанавливается на мультиклапан Tomasetto AT02 Сопротивление: от 0 до 50 Ом; Рабочая температура: -20 °С ~ 120 °С Материал: медь/нейлон/ПВХ Напряжение: DC 10 В-16 В ISO/TS 16949 10R-03
6	Датчиком давления SMART 2012	Lovato FSU FILTER PT	1	Датчик давления интегрирован в фильтр

		Sensor 161511000		газовой фазы
7	Блок электромагнитных клапанов	409061.115601 0 Lovato 238000028	1	Блок электромагнитных клапанов для подачи газового топлива включает в себя рампу крепления электромагнитных клапанов с четырьмя электромагнитными клапанами и штуцерами подачи газа с дозирующими отверстиями Ø2,4 мм. Требования к управляющему импульсу клапанов: тип Pick – Hold (4 А - 1,5 А), номинальное резистивное сопротивление катушки индуктивности 2,1 Ом.
8	Газовый редуктор-испаритель CNG	Lovato RMJ-3 536896000	1	$P_{gas} = 1.8 \text{ Bar}$ (140кВт) В состав редуктора входит электромагнитный клапан и датчик температуры редуктора
9	Запорный вентиль на газовом баллоне CNG	Tomasetto VMAT7701	2	
10	Манометр с выходом в блок управления CNG	АЕВ 806	2	Устанавливается на вентиль Tomasetto VMAT7701
11	Баллон газовый	БАЖ-96-315	2	Пропан-бутан. $P_{ном} = 1.6 \text{ МПа}$
12	Баллон газовый	БА 80.20.327/1360	2	Природный газ. $P_{ном} = 25 \text{ МПа}$

## Приложение Г

(обязательное)

Дата <u>13.10.2016</u>						Протокол испытаний № 1											
Двигатель <u>ЗМЗ 409061</u> <u>№409061F004836</u>						Топливо <u>бензин А-92</u>						Параметры окружающей среды					
Характеристика <u>испытания цикл D2</u>						Давление в рампе Pp: <u>0,42 МПа</u>						Температура воздуха, t <sub>возд</sub>			20		
n, мин <sup>-1</sup> <u>2500</u>												Барометрическое давление, мм Hg			760		
												Влажность воздуха			87%		
№	T <sub>ог</sub> , С	до нейтрализатора				до нейтрализатора						после нейтрализатора					
		P <sub>e</sub> , кгс	G <sub>T</sub> , кг/ч	G <sub>в</sub> , кг/ч	α	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	CH <sup>p</sup> , ppm	CO <sub>2</sub> , %	λ	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	CH <sup>p</sup> , ppm	CO <sub>2</sub> , %	λ
1	710	25,7	9,9	142,0	0,97	0,84	5740	64	110	14,29	0,985	0,42	170	20	40	14,86	0,988
2	664	19,3	7,7	112,0	0,99	0,64	5750	85	130	14,32	0,997	0,1	0	30	45	15,01	0,996
3	610	12,8	5,8	84,0	0,98	0,57	5900	60	87	14,32	1,001	0,09	0	0	0	14,88	1,000
4	540	6,4	3,9	56,0	0,99	0,5	2900	30	45	14,42	1,001	0,08	0	0	0	14,80	1,004
5	514	2,5	3,0	42,0	0,99	0,41	780	16	28	14,50	1,003	0,02	0	0	0	14,81	1,007

Дата <u>13.10.2016</u>						Протокол испытаний № 2											
Двигатель <u>ЗМЗ 409061</u> <u>№409061F004836</u>						Топливо <u>пропан-бутан</u>  Давление в рампе Pp: <u>190 кПа</u>						Параметры окружающей среды					
												Температура воздуха, t <sub>возд</sub>					
Характеристика <u>испытания цикл D2</u>												Барометрическое давление, мм Hg					
												760					
n, мин <sup>-1</sup> <u>2500</u>												Влажность воздуха					
						до нейтрализатора						после нейтрализатора					
№	T <sub>ог</sub> , C	P <sub>e</sub> , кгс	G <sub>T</sub> , кг/ч	G <sub>в</sub> , кг/ч	α	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	CH <sup>p</sup> , ppm	CO <sub>2</sub> , %	λ	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	CH <sup>p</sup> , ppm	CO <sub>2</sub> , %	λ
1	690	25,7	9,7	144,5	0,99	0,66	5700	90	139	12,12	0,996	0,17	54	11	23	12,75	0,996
2	650	19,3	7,6	114,0	0,99	0,56	5900	85	131	12,29	0,996	0,09	11	31	48	12,88	1,000
3	586	12,8	5,6	85,0	0,98	0,63	5800	98	151	12,68	0,996	0,10	7	40	65	13,17	0,997
4	500	6,4	3,7	55,0	0,98	0,53	2600	64	103	12,78	1,000	0,09	0	7	12	13,25	1,004
5	491	2,5	2,7	40,0	0,99	0,41	650	42	61	12,90	1,000	0,01	7	0	0	13,21	1,005

Дата <u>13.10.2016</u>						Протокол испытаний № 3											
Двигатель <u>ЗМЗ 409061</u> <u>№409061F004836</u>						Топливо <u>природный газ (КПГ)</u>  Давление в рампе Pp: <u>244 кПа</u>						Параметры окружающей среды					
												Температура воздуха, t <sub>возд</sub>					
Характеристика <u>испытания цикл D2</u>						n, мин <sup>-1</sup> <u>2500</u>						Барометрическое давление, мм Hg					
												760					
												Влажность воздуха					
												87%					
№	T <sub>ог</sub> , C					до нейтрализатора						после нейтрализатора					
		P <sub>e</sub> , кгс	G <sub>T</sub> , кг/ч	G <sub>в</sub> , кг/ч	α	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	CH <sup>p</sup> , ppm	CO <sub>2</sub> , %	λ	CO, %	NO, ppm	CH, ppm	CH <sup>p</sup> , ppm	CO <sub>2</sub> , %	λ
1	670	25,2	8,1	144,0	1,00	0,64	5800	55	79	10,80	0,997	0,13	50	35	53	11,48	0,994
2	637	18,8	6,7	114,0	0,99	0,59	5600	77	110	10,73	1,004	0,08	3	26	40	11,40	0,997
3	600	13,4	5,1	87,0	0,98	0,58	3900	94	143	10,83	0,999	0,09	0	64	99	11,40	0,993
4	540	7,0	3,4	57,0	0,98	0,51	1600	73	113	10,82	0,997	0,08	0	47	74	11,33	0,995
5	490	3,1	2,4	39,5	0,98	0,53	480	70	108	10,91	0,996	0,07	0	61	91	11,32	0,995

**Приложение Д**  
(информационное)

**Протокол № 4 от 13.10.2016 г.**  
**по результатам испытаний горюче-смазочных материалов**

Договор	№ 1721602 от 10.09.16 г.
Заказчик, адрес	ООО «Мика Мотор»
Описание и шифр образца	Образец бензина автомобильного №1
Акт отбора (передачи) образцов	Акт № 152.6.16 от 13.10.2016 г. Отбор образцов произведен заказчиком
Дата проведения испытаний	13.10.2016 г.
Цель испытаний	Определение октанового числа, фракционного состава бензина и концентрации фактических смол на соответствие показателей ГОСТ Р 51105-97
Метод испытаний	Моторный метод определения октанового числа по ГОСТ 511-82; исследовательский метод определения октанового числа по ГОСТ 8226-82; определение фракционного состава по методу А по ГОСТ 2177-99 (ИСО 3405-88); метод определения фактических смол по ГОСТ 1567-97
Испытательное оборудование	(1) Одноцилиндровая универсальная установка УИТ-85; (2) Ручной аппарат для перегонки нефтепродуктов АРНС-1Э; (3) Аппарат для определения смол выпариванием струёй воздуха ТОС-ЛАБ-02; (4) Весы лабораторные АВ 210-01

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателя	Требования по ГОСТ Р 51105-97	Фактическое значение
1.	Детонационная стойкость:		
1.1.	октановое число, определяемое по моторному методу, не менее	83	83,4 <sup>1</sup>
1.2.	октановое число, определяемое по исследовательскому методу, не менее	92	94,0 <sup>1</sup>
2.	Фракционный состав:		
2.1.	температура начала кипения, °С, не ниже	не нормируется	38
2.2.	Объём испарившегося бензина, %		

	при температуре 70 °С мин.	15	21 <sup>2</sup>
	при температуре 70 °С макс.	48	
	при температуре 100 °С мин.	40	49
	при температуре 100 °С макс.	70	
	при температуре 150 °С, не менее	75	90
2. 3.	температура конца кипения, °С, не выше	215	182
2. 4.	остаток в колбе, %, не более	2	1,0
2. 5.	остатки и потери, %, не более	не нормируется	2,4
3.	Цвет	Чистый прозрачный	Чистый прозрачный
4.	Концентрация фактических смол, мг на 100 см <sup>3</sup>	не более 5	2,3

<sup>1</sup>Погрешность определения октанового числа:  $\pm 0,5$  ед.

<sup>2</sup>Погрешность определения объёма испарившегося бензина:  $\pm 1,0\%$

Результаты испытаний относятся только к представленному образцу.

## 10. Вывод

Представленный образец бензина соответствует требованиям, предъявляемым к марке Регуляр-92 ГОСТ Р 51105-97 по всем определяемым показателям в пределах погрешности измерений.



**Приложение 3**  
(информационное)

время, мс	MeAct, Н·м (Реализованный эффективный момент)	MiAct, Н·м (Реализованный индикаторный момент)	Mfrc, Н·м (Момент механических потерь)	Me, Н·м (Требуемый эффективный момент)	N, об/мин (обороты двигателя)	Ne, кВт (Мощность двигателя)	qcmBnzClc, мг/ц (Расчетная цикловая топливоподача бензина)	qcmGasClc, мг/ц (Расчетная цикловая топливоподача газа)	alfaClc, - (Реализованный коэффициент избытка воздуха)	gtAir, кг/ч (Расход воздуха через двигатель)	gtBnzAct, кг/ч (Расход бензина реализованный)	gtGasAct, кг/ч (Расход газа реализованный)	pGasAct, кПа (Абсолютное давление газа в рампе)
0	175,4	197,2	21,8	177	2501	45,8	32,67	0	0,994	142,1	9,76	0	114
0,016	175,4	197,2	21,8	177	2497	45,8	32,84	0	0,994	142,1	9,76	0	114
0,063	177	198,8	21,8	177	2497	46,3	32,84	0	0,993	142,8	9,81	0	112,7
0,094	177	198,8	21,8	177	2500	46,3	32,84	0	0,993	142,8	9,81	0	112,7
0,125	176,2	198	21,8	177	2500	46,1	32,84	0	0,991	142,5	9,8	0	114
0,157	176,2	198	21,8	177	2502	46,1	32,76	0	0,991	142,5	9,8	0	114
0,204	175,8	197,6	21,8	177	2502	46	32,76	0	0,991	141,4	9,82	0	114
0,219	175,8	197,6	21,8	177	2498	46	32,86	0	0,991	141,4	9,82	0	114
0,266	177,8	199,6	21,8	177	2498	46,5	32,86	0	0,991	142,8	9,84	0	112,8
0,297	177,8	199,6	21,8	177	2502	46,5	32,68	0	0,991	142,8	9,84	0	112,8
0,328	176,6	198,4	21,8	177	2502	46,2	32,68	0	0,989	141,6	9,77	0	112,7
0,36	176,6	198,4	21,8	177	2502	46,2	33,04	0	0,989	141,6	9,77	0	112,7
0,407	176,6	198,4	21,8	177	2502	46,3	33,04	0	0,99	141,8	9,85	0	112,7
0,422	176,6	198,4	21,8	177	2504	46,3	32,88	0	0,99	141,8	9,85	0	112,7
0,469	177,4	199,2	21,8	177	2504	46,5	32,88	0	0,992	142,7	9,8	0	114
0,5	177,4	199,2	21,8	177	2505	46,5	32,54	0	0,992	142,7	9,8	0	114
0,532	176,2	198	21,8	177	2505	46,1	32,54	0	0,993	142,1	9,76	0	114
0,563	176,2	198	21,8	177	2500	46,1	32,69	0	0,993	142,1	9,76	0	114
0,61	176,6	198,4	21,8	177	2500	46,2	32,69	0	0,993	142,4	9,77	0	114

0,625	176,6	198,4	21,8	177	2502	46,2	32,7	0	0,993	142,4	9,77	0	114
0,672	176,2	198	21,8	177	2502	46,1	32,7	0	0,995	142,4	9,81	0	114
0,703	176,2	198	21,8	177	2503	46,1	32,54	0	0,995	142,4	9,81	0	114
0,735	176,2	198	21,8	177	2503	46,1	32,54	0	0,996	142,5	9,77	0	114
0,766	176,2	198	21,8	177	2502	46,1	32,81	0	0,996	142,5	9,77	0	114
0,813	176,6	198,4	21,8	177	2502	46,2	32,81	0	0,992	142,1	9,8	0	114
0,829	176,6	198,4	21,8	177	2502	46,2	32,64	0	0,992	142,1	9,8	0	114
0,875	177	198,8	21,8	177	2502	46,3	32,64	0	0,989	142,2	9,8	0	114
0,907	177	198,8	21,8	177	2497	46,3	32,7	0	0,989	142,2	9,8	0	114
0,938	176,6	198,4	21,8	177	2497	46,2	32,7	0	0,989	141,9	9,8	0	112,4
0,969	176,6	198,4	21,8	177	2498	46,2	32,97	0	0,989	141,9	9,8	0	112,4
1,016	176,2	198	21,8	177	2498	46	32,97	0	0,989	142,2	9,82	0	112,4
1,032	176,2	198	21,8	177	2494	46	33,07	0	0,989	142,2	9,82	0	112,4
1,079	177,4	199,2	21,8	177	2494	46,3	33,07	0	0,989	143	9,88	0	114
1,11	177,4	199,2	21,8	177	2498	46,3	33,01	0	0,989	143	9,88	0	114
1,141	177	198,8	21,8	177	2498	46,2	33,01	0	0,987	142,3	9,86	0	114
1,172	177	198,8	21,8	177	2499	46,2	32,86	0	0,987	142,3	9,86	0	114
1,203	178,6	200,4	21,8	177	2499	46,7	32,86	0	0,986	142,8	9,86	0	113,8
1,235	178,6	200,4	21,8	177	2501	46,7	32,83	0	0,986	142,8	9,86	0	113,8
1,282	177,4	199,2	21,8	177	2501	46,5	32,83	0	0,986	141,8	9,86	0	114
1,313	177,4	199,2	21,8	177	2504	46,5	33,04	0	0,986	141,8	9,86	0	114
1,344	177,4	199,2	21,8	177	2504	46,4	33,04	0	0,988	142,1	9,86	0	114
1,375	177,4	199,2	21,8	177	2500	46,4	32,79	0	0,988	142,1	9,86	0	114
1,407	178,2	200	21,8	177	2500	46,7	32,79	0	0,989	142,8	9,84	0	114
1,422	178,2	200	21,8	177	2500	46,7	32,79	0	0,989	142,8	9,84	0	114
1,438	178,2	200	21,8	177	2504	46,7	32,69	0	0,989	142,8	9,84	0	114
1,485	175,8	197,6	21,8	177	2504	46	32,69	0	0,992	141,5	9,84	0	114
1,516	175,8	197,6	21,8	177	2502	46	32,92	0	0,992	141,5	9,84	0	114
1,547	177	198,8	21,8	177	2502	46,4	32,92	0	0,991	142,5	9,81	0	112,7
1,579	177	198,8	21,8	177	2504	46,4	32,85	0	0,991	142,5	9,81	0	112,7

1,61	177,4	199,2	21,8	177	2504	46,5	32,85	0	0,991	142,9	9,83	0	114
1,641	177,4	199,2	21,8	177	2508	46,5	32,79	0	0,991	142,9	9,83	0	114
1,688	176,6	198,4	21,8	177	2508	46,3	32,79	0	0,993	142,5	9,82	0	114
1,719	176,6	198,4	21,8	177	2509	46,3	32,82	0	0,993	142,5	9,82	0	114
1,75	176,2	198	21,8	175,5	2509	46,3	32,82	0	0,994	142,9	9,83	0	114
1,782	176,2	198	21,8	175,5	2510	46,3	32,4	0	0,994	142,9	9,83	0	114
1,813	175,8	197,6	21,8	176,7	2510	46	32,4	0	0,996	142	9,74	0	114
1,844	175,8	197,6	21,8	176,7	2506	46	32,6	0	0,996	142	9,74	0	114
1,891	176,2	198	21,8	176,7	2506	46,2	32,6	0	0,995	142,7	9,77	0	114
1,907	176,2	198	21,8	176,7	2508	46,2	32,7	0	0,995	142,7	9,77	0	114
1,954	177	198,8	21,8	176,7	2508	46,4	32,7	0	0,994	143,2	9,8	0	114
1,985	177	198,8	21,8	176,7	2509	46,4	32,72	0	0,994	143,2	9,8	0	114
2,016	176,2	198	21,8	176,7	2509	46,2	32,72	0	0,993	142,1	9,8	0	114
2,047	176,2	198	21,8	176,7	2505	46,2	32,67	0	0,993	142,1	9,8	0	114
2,094	177	198,8	21,8	176,7	2505	46,4	32,67	0	0,991	142,5	9,77	0	114
2,11	177	198,8	21,8	176,7	2502	46,4	32,86	0	0,991	142,5	9,77	0	114
2,157	177,8	199,6	21,8	176,7	2502	46,5	32,86	0	0,989	142,5	9,8	0	114
2,188	177,8	199,6	21,8	176,7	2500	46,5	32,78	0	0,989	142,5	9,8	0	114
2,219	175,8	197,6	21,8	176,7	2500	46	32,78	0	0,989	141,9	9,81	0	113,8
2,25	175,8	197,6	21,8	176,7	2498	46	32,99	0	0,989	141,9	9,81	0	113,8
2,297	176,6	198,4	21,8	176,7	2498	46,1	32,99	0	0,989	142,3	9,83	0	114
2,313	176,6	198,4	21,8	176,7	2497	46,1	32,94	0	0,989	142,3	9,83	0	114
2,36	177,4	199,2	21,8	176,7	2497	46,4	32,94	0	0,987	142,9	9,86	0	114
2,391	177,4	199,2	21,8	176,7	2496	46,4	32,89	0	0,987	142,9	9,86	0	114
2,422	177,8	199,6	21,8	176,7	2496	46,5	32,89	0	0,986	142,2	9,86	0	114
2,454	177,8	199,6	21,8	176,7	2502	46,5	33,08	0	0,986	142,2	9,86	0	114
2,501	177,8	199,6	21,8	176,7	2502	46,5	33,08	0	0,984	141,7	9,86	0	114
2,516	177,8	199,6	21,8	176,7	2502	46,5	32,9	0	0,984	141,7	9,86	0	114
2,563	178,2	200	21,8	176,7	2502	46,6	32,9	0	0,984	142,2	9,86	0	114
2,594	178,2	200	21,8	176,7	2503	46,6	33,07	0	0,984	142,2	9,86	0	114

2,625	175,8	197,6	21,8	176,7	2503	46	33,07	0	0,983	141,1	9,86	0	114
2,657	175,8	197,6	21,8	176,7	2498	46	33,13	0	0,983	141,1	9,86	0	114
2,704	178,2	200	21,8	176,7	2498	46,6	33,13	0	0,986	142,6	9,86	0	113,8
2,719	178,2	200	21,8	176,7	2499	46,6	32,9	0	0,986	142,6	9,86	0	113,8
2,766	177	198,8	21,8	176,7	2499	46,4	32,9	0	0,988	141,8	9,85	0	113,7
2,797	177	198,8	21,8	176,7	2503	46,4	32,9	0	0,988	141,8	9,85	0	113,7
2,829	177,4	199,2	21,8	176,7	2503	46,4	32,9	0	0,989	142,3	9,81	0	114
2,86	177,4	199,2	21,8	176,7	2500	46,4	32,68	0	0,989	142,3	9,81	0	114
2,907	177,4	199,2	21,8	176,7	2500	46,4	32,68	0	0,989	142,3	9,81	0	114
2,922	177,4	199,2	21,8	176,7	2500	46,4	32,71	0	0,989	142,3	9,81	0	114
2,969	174,6	196,4	21,8	176,7	2500	45,6	32,71	0	0,991	141,3	9,8	0	114
3,001	174,6	196,4	21,8	176,7	2500	45,6	32,79	0	0,991	141,3	9,8	0	114
3,032	175,8	197,6	21,8	176,7	2500	46	32,79	0	0,991	141,7	9,8	0	112,7
3,063	175,8	197,6	21,8	176,7	2492	46	32,72	0	0,991	141,7	9,8	0	112,7
3,11	175	196,8	21,8	176,7	2492	45,7	32,72	0	0,994	141,8	9,77	0	114
3,126	175	196,8	21,8	176,7	2494	45,7	32,86	0	0,994	141,8	9,77	0	114
3,172	175,8	197,6	21,8	177,9	2494	45,8	32,86	0	0,994	142,1	9,77	0	112,7
3,204	175,8	197,6	21,8	177,9	2490	45,8	32,86	0	0,994	142,1	9,77	0	112,7
3,235	176,6	198,4	21,8	177	2490	46	32,86	0	0,991	142,6	9,8	0	114
3,266	176,6	198,4	21,8	177	2494	46	32,89	0	0,991	142,6	9,8	0	114
3,313	176,2	198	21,8	177	2494	46	32,89	0	0,989	142,2	9,83	0	114
3,329	176,2	198	21,8	177	2494	46	33,07	0	0,989	142,2	9,83	0	114
3,376	177	198,8	21,8	177	2494	46,2	33,07	0	0,989	142,7	9,85	0	114
3,407	177	198,8	21,8	177	2492	46,2	32,82	0	0,989	142,7	9,85	0	114
3,438	177	198,8	21,8	177	2492	46,2	32,82	0	0,989	142,5	9,82	0	114
3,469	177	198,8	21,8	177	2496	46,2	32,82	0	0,989	142,5	9,82	0	114
3,516	175,4	197,2	21,8	177	2496	45,8	32,82	0	0,991	141,6	9,81	0	114
3,532	175,4	197,2	21,8	177	2498	45,8	32,95	0	0,991	141,6	9,81	0	114
3,579	177,4	199,2	21,8	177	2498	46,4	32,95	0	0,993	142,8	9,84	0	114
3,61	177,4	199,2	21,8	177	2501	46,4	32,76	0	0,993	142,8	9,84	0	114

3,641	176,2	198	21,8	177	2501	46,1	32,76	0	0,993	142	9,84	0	114
3,672	176,2	198	21,8	177	2506	46,1	32,9	0	0,993	142	9,84	0	114
3,704	176,6	198,4	21,8	177	2506	46,3	32,9	0	0,99	141,8	9,83	0	114
3,735	176,6	198,4	21,8	177	2505	46,3	32,88	0	0,99	141,8	9,83	0	114
3,782	177,4	199,2	21,8	177	2505	46,4	32,88	0	0,989	142,4	9,8	0	112,5
3,813	177,4	199,2	21,8	177	2502	46,4	32,82	0	0,989	142,4	9,8	0	112,5
3,844	176,2	198	21,8	177	2502	46	32,82	0	0,989	142,2	9,83	0	114
3,876	176,2	198	21,8	177	2498	46	32,9	0	0,989	142,2	9,83	0	114
3,907	176,6	198,4	21,8	177	2498	46,2	32,9	0	0,989	142,5	9,81	0	114
3,922	176,6	198,4	21,8	177	2498	46,2	32,9	0	0,989	142,5	9,81	0	114
3,938	176,6	198,4	21,8	177	2499	46,2	33,09	0	0,989	142,5	9,81	0	114
3,985	176,6	198,4	21,8	177	2499	46,1	33,09	0	0,991	142,7	9,85	0	112,7
4,016	176,6	198,4	21,8	177	2494	46,1	32,79	0	0,991	142,7	9,85	0	112,7
4,047	175,8	197,6	21,8	177	2494	45,9	32,79	0	0,992	142,1	9,8	0	114
4,079	175,8	197,6	21,8	177	2498	45,9	32,95	0	0,992	142,1	9,8	0	114
4,126	177,4	199,2	21,8	177	2498	46,4	32,95	0	0,989	142,6	9,83	0	114
4,141	177,4	199,2	21,8	177	2500	46,4	32,92	0	0,989	142,6	9,83	0	114
4,188	177,4	199,2	21,8	177	2500	46,4	32,92	0	0,989	142,9	9,86	0	114
4,219	177,4	199,2	21,8	177	2492	46,4	32,99	0	0,989	142,9	9,86	0	114
4,251	175,4	197,2	21,8	177	2492	45,8	32,99	0	0,988	141,3	9,86	0	114
4,282	175,4	197,2	21,8	177	2499	45,8	33,01	0	0,988	141,3	9,86	0	114
4,313	177	198,8	21,8	177	2499	46,2	33,01	0	0,989	142,5	9,84	0	113,7
4,344	177	198,8	21,8	177	2504	46,2	32,93	0	0,989	142,5	9,84	0	113,7
4,391	177,8	199,6	21,8	177	2504	46,6	32,93	0	0,988	142,7	9,89	0	114
4,422	177,8	199,6	21,8	177	2504	46,6	32,88	0	0,988	142,7	9,89	0	114
4,454	176,2	198	21,8	177	2504	46,1	32,88	0	0,991	141,6	9,84	0	114
4,485	176,2	198	21,8	177	2503	46,1	32,82	0	0,991	141,6	9,84	0	114
4,516	177,4	199,2	21,8	177	2503	46,4	32,82	0	0,991	142,8	9,8	0	114
4,547	177,4	199,2	21,8	177	2499	46,4	32,77	0	0,991	142,8	9,8	0	114
4,594	177,4	199,2	21,8	177	2499	46,4	32,77	0	0,992	142,9	9,8	0	114

4,626	177,4	199,2	21,8	177	2502	46,4	32,85	0	0,992	142,9	9,8	0	114
4,657	176,6	198,4	21,8	177	2502	46,2	32,85	0	0,993	142,1	9,81	0	114
4,688	176,6	198,4	21,8	177	2498	46,2	32,89	0	0,993	142,1	9,81	0	114
4,735	178,2	200	21,8	177	2498	46,7	32,89	0	0,991	143,2	9,81	0	112,7
4,751	178,2	200	21,8	177	2503	46,7	32,79	0	0,991	143,2	9,81	0	112,7
4,797	176,2	198	21,8	177	2503	46	32,79	0	0,99	142,3	9,82	0	114
4,829	176,2	198	21,8	177	2502	46	32,72	0	0,99	142,3	9,82	0	114
4,86	175,8	197,6	21,8	177	2502	46	32,72	0	0,993	141,6	9,81	0	113,7
4,891	175,8	197,6	21,8	177	2501	46	32,61	0	0,993	141,6	9,81	0	113,7
4,938	175,8	197,6	21,8	177	2501	45,9	32,61	0	0,992	142,3	9,75	0	114
4,954	175,8	197,6	21,8	177	2499	45,9	32,78	0	0,992	142,3	9,75	0	114
5,001	175,4	197,2	21,8	177	2499	45,8	32,78	0	0,993	142,2	9,8	0	114
5,032	175,4	197,2	21,8	177	2494	45,8	32,86	0	0,993	142,2	9,8	0	114
5,063	175,8	197,6	21,8	177	2494	45,9	32,86	0	0,993	142,3	9,8	0	114
5,094	175,8	197,6	21,8	177	2498	45,9	32,9	0	0,993	142,3	9,8	0	114
5,126	176,2	198	21,8	177	2498	46	32,9	0	0,99	142,3	9,81	0	113,7
5,157	176,2	198	21,8	177	2493	46	32,94	0	0,99	142,3	9,81	0	113,7
5,204	176,2	198	21,8	177	2493	46	32,94	0	0,989	142,2	9,83	0	114
5,235	176,2	198	21,8	177	2494	46	33,11	0	0,989	142,2	9,83	0	114
5,266	176,6	198,4	21,8	177	2494	46,1	33,11	0	0,988	142,3	9,85	0	114
5,297	176,6	198,4	21,8	177	2496	46,1	32,88	0	0,988	142,3	9,85	0	114
5,329	177,8	199,6	21,8	177	2496	46,4	32,88	0	0,986	142,8	9,84	0	112,7
5,36	177,8	199,6	21,8	177	2496	46,4	33,1	0	0,986	142,8	9,84	0	112,7
5,407	178,2	200	21,8	177	2496	46,6	33,1	0	0,986	142,5	9,88	0	114
5,438	178,2	200	21,8	177	2502	46,6	32,99	0	0,986	142,5	9,88	0	114
5,469	177	198,8	21,8	177	2502	46,3	32,99	0	0,986	142,3	9,86	0	114
5,501	177	198,8	21,8	177	2500	46,3	32,76	0	0,986	142,3	9,86	0	114
5,532	176,6	198,4	21,8	177	2500	46,2	32,76	0	0,988	142,3	9,84	0	114
5,563	176,6	198,4	21,8	177	2501	46,2	32,95	0	0,988	142,3	9,84	0	114
5,61	177,4	199,2	21,8	177	2501	46,4	32,95	0	0,989	142,2	9,88	0	114

5,641	177,4	199,2	21,8	177	2502	46,4	32,72	0	0,989	142,2	9,88	0	114
5,672	177,4	199,2	21,8	177	2502	46,5	32,72	0	0,991	142,7	9,82	0	114
5,704	177,4	199,2	21,8	177	2499	46,5	32,65	0	0,991	142,7	9,82	0	114
5,735	176,2	198	21,8	177	2499	46,1	32,65	0	0,991	141,9	9,82	0	113,7
5,766	176,2	198	21,8	177	2500	46,1	32,84	0	0,991	141,9	9,82	0	113,7
5,813	175	196,8	21,8	177	2500	45,7	32,84	0	0,993	141,7	9,77	0	112,7
5,844	175	196,8	21,8	177	2500	45,7	32,76	0	0,993	141,7	9,77	0	112,7
5,876	176,6	198,4	21,8	177	2500	46,2	32,76	0	0,993	142,4	9,8	0	113,7
5,907	176,6	198,4	21,8	177	2504	46,2	32,89	0	0,993	142,4	9,8	0	113,7
5,938	176,6	198,4	21,8	177	2504	46,2	32,89	0	0,991	142,1	9,82	0	113,7
5,969	176,6	198,4	21,8	177	2502	46,2	32,79	0	0,991	142,1	9,82	0	113,7
6,016	178,2	200	21,8	177	2502	46,7	32,79	0	0,989	142,8	9,81	0	113,7
6,032	178,2	200	21,8	177	2501	46,7	32,82	0	0,989	142,8	9,81	0	113,7
6,079	178,6	200,4	21,8	177	2501	46,8	32,82	0	0,989	143,2	9,86	0	112,7
6,11	178,6	200,4	21,8	177	2508	46,8	32,77	0	0,989	143,2	9,86	0	112,7
6,141	176,2	198	21,8	177	2508	46,2	32,77	0	0,991	142,2	9,86	0	114
6,172	176,2	198	21,8	177	2509	46,2	32,69	0	0,991	142,2	9,86	0	114
6,219	175,4	197,2	21,8	176,7	2509	46	32,69	0	0,993	141,9	9,82	0	114
6,235	175,4	197,2	21,8	176,7	2512	46	32,69	0	0,993	141,9	9,82	0	114
6,282	176,2	198	21,8	176,7	2512	46,3	32,69	0	0,993	142,4	9,82	0	114
6,313	176,2	198	21,8	176,7	2506	46,3	32,79	0	0,993	142,4	9,82	0	114
6,344	175,8	197,6	21,8	176,7	2506	46,1	32,79	0	0,994	142,3	9,81	0	114
6,376	175,8	197,6	21,8	176,7	2506	46,1	32,79	0	0,994	142,3	9,81	0	114
6,422	177	198,8	21,8	176,7	2506	46,4	32,79	0	0,996	142	9,77	0	114
6,454	177	198,8	21,8	176,7	2505	46,4	32,67	0	0,996	142	9,77	0	114
6,485	177	198,8	21,8	176,7	2505	46,3	32,67	0	0,992	142,4	9,77	0	113,7
6,516	177	198,8	21,8	176,7	2502	46,3	32,79	0	0,992	142,4	9,77	0	113,7
6,547	176,6	198,4	21,8	176,7	2502	46,3	32,79	0	0,991	142,1	9,82	0	114
6,579	176,6	198,4	21,8	176,7	2506	46,3	32,9	0	0,991	142,1	9,82	0	114
6,626	177	198,8	21,8	176,7	2506	46,4	32,9	0	0,989	142,1	9,83	0	114

6,657	177	198,8	21,8	176,7	2506	46,4	32,7	0	0,989	142,1	9,83	0	114
6,688	177,8	199,6	21,8	176,7	2506	46,6	32,7	0	0,989	143	9,85	0	114
6,719	177,8	199,6	21,8	176,7	2507	46,6	32,74	0	0,989	143	9,85	0	114
6,751	175,8	197,6	21,8	176,7	2507	46,1	32,74	0	0,993	141,9	9,82	0	114
6,782	175,8	197,6	21,8	176,7	2510	46,1	32,67	0	0,993	141,9	9,82	0	114
6,829	175	196,8	21,8	174,9	2510	46	32,67	0	0,999	143	9,82	0	114
6,844	175	196,8	21,8	174,9	2511	46	32,5	0	0,999	143	9,82	0	114
6,891	174,6	196,4	21,8	174,9	2511	45,9	32,5	0	0,996	142,2	9,8	0	112,8
6,922	174,6	196,4	21,8	174,9	2513	45,9	32,56	0	0,996	142,2	9,8	0	112,8
6,954	174,6	196,4	21,8	176,4	2513	45,8	32,56	0	0,996	141,7	9,75	0	113,7
6,985	174,6	196,4	21,8	176,4	2512	45,8	32,54	0	0,996	141,7	9,75	0	113,7
7,032	175	196,8	21,8	174,9	2512	46	32,54	0	0,995	142,4	9,77	0	114
7,063	175	196,8	21,8	174,9	2510	46	32,43	0	0,995	142,4	9,77	0	114
7,094	175,8	197,6	21,8	176,1	2510	46,2	32,43	0	0,996	142,9	9,76	0	114
7,126	175,8	197,6	21,8	176,1	2509	46,2	32,51	0	0,996	142,9	9,76	0	114
7,157	175	196,8	21,8	176,1	2509	45,9	32,51	0	0,997	142,5	9,75	0	114
7,188	175	196,8	21,8	176,1	2506	45,9	32,53	0	0,997	142,5	9,75	0	114
7,235	175	196,8	21,8	176,1	2506	45,9	32,53	0	0,998	142,2	9,73	0	113,7
7,266	175	196,8	21,8	176,1	2507	45,9	32,54	0	0,998	142,2	9,73	0	113,7
7,297	176,2	198	21,8	176,1	2507	46,2	32,54	0	0,996	142,9	9,77	0	114
7,329	176,2	198	21,8	176,1	2501	46,2	32,67	0	0,996	142,9	9,77	0	114
7,36	175,8	197,6	21,8	176,1	2501	46	32,67	0	0,994	142,1	9,77	0	113,7
7,391	175,8	197,6	21,8	176,1	2504	46	32,82	0	0,994	142,1	9,77	0	113,7
7,438	176,6	198,4	21,8	176,1	2504	46,2	32,82	0	0,991	142,3	9,8	0	113,7
7,469	176,6	198,4	21,8	176,1	2506	46,2	32,63	0	0,991	142,3	9,8	0	113,7
7,501	175,8	197,6	21,8	176,1	2506	46,1	32,63	0	0,991	141,8	9,81	0	114
7,532	175,8	197,6	21,8	176,1	2506	46,1	32,82	0	0,991	141,8	9,81	0	114
7,563	175,4	197,2	21,8	176,1	2506	46	32,82	0	0,99	141,4	9,8	0	113,7
7,594	175,4	197,2	21,8	176,1	2506	46	32,9	0	0,99	141,4	9,8	0	113,7
7,641	177,4	199,2	21,8	176,1	2506	46,5	32,9	0	0,987	142,8	9,83	0	114



7,672	177,4	199,2	21,8	176,1	2507	46,5	32,64	0	0,987	142,8	9,83	0	114
7,704	176,6	198,4	21,8	176,1	2507	46,4	32,64	0	0,986	142,2	9,82	0	114
7,735	176,6	198,4	21,8	176,1	2511	46,4	32,78	0	0,986	142,2	9,82	0	114
7,766	176,2	198	21,8	176,1	2511	46,2	32,78	0	0,986	141,8	9,81	0	114
7,797	176,2	198	21,8	176,1	2506	46,2	32,72	0	0,986	141,8	9,81	0	114
7,844	177	198,8	21,8	176,1	2506	46,5	32,72	0	0,986	142,4	9,77	0	114
7,875	177	198,8	21,8	176,1	2509	46,5	32,7	0	0,986	142,4	9,77	0	114
7,907	175,8	197,6	21,8	176,1	2509	46,1	32,7	0	0,989	141,8	9,83	0	114
7,938	175,8	197,6	21,8	176,1	2506	46,1	32,58	0	0,989	141,8	9,83	0	114
7,985	176,2	198	21,8	176,1	2506	46,2	32,58	0	0,989	142,2	9,77	0	114
8,001	176,2	198	21,8	176,1	2506	46,2	32,65	0	0,989	142,2	9,77	0	114
8,047	177	198,8	21,8	176,1	2506	46,3	32,65	0	0,986	142,1	9,77	0	114
8,079	177	198,8	21,8	176,1	2502	46,3	32,78	0	0,986	142,1	9,77	0	114
8,11	176,6	198,4	21,8	176,1	2502	46,2	32,78	0	0,986	141,6	9,82	0	114
8,141	176,6	198,4	21,8	176,1	2500	46,2	32,88	0	0,986	141,6	9,82	0	114
8,188	176,6	198,4	21,8	176,1	2500	46,2	32,88	0	0,985	141,6	9,81	0	113,7
8,204	176,6	198,4	21,8	176,1	2502	46,2	32,92	0	0,985	141,6	9,81	0	113,7
8,251	178,2	200	21,8	176,1	2502	46,6	32,92	0	0,984	142,4	9,82	0	114
8,282	178,2	200	21,8	176,1	2502	46,6	32,69	0	0,984	142,4	9,82	0	114
8,313	177	198,8	21,8	176,1	2502	46,4	32,69	0	0,984	141,8	9,8	0	114
8,344	177	198,8	21,8	176,1	2506	46,4	32,97	0	0,984	141,8	9,8	0	114
8,376	177,4	199,2	21,8	176,1	2506	46,5	32,97	0	0,984	142,3	9,85	0	114
8,407	177,4	199,2	21,8	176,1	2506	46,5	32,81	0	0,984	142,3	9,85	0	114
8,454	178,2	200	21,8	176,1	2506	46,7	32,81	0	0,983	142,8	9,86	0	114
8,485	178,2	200	21,8	176,1	2504	46,7	32,97	0	0,983	142,8	9,86	0	114
8,516	177,4	199,2	21,8	176,1	2504	46,5	32,97	0	0,982	141,8	9,9	0	114
8,547	177,4	199,2	21,8	176,1	2505	46,5	33,08	0	0,982	141,8	9,9	0	114
8,579	177	198,8	21,8	176,1	2505	46,3	33,08	0	0,982	141,4	9,88	0	114
8,61	177	198,8	21,8	176,1	2503	46,3	32,71	0	0,982	141,4	9,88	0	114
8,657	176,6	198,4	21,8	176,1	2503	46,3	32,71	0	0,986	141,8	9,83	0	113,7

8,688	176,6	198,4	21,8	176,1	2500	46,3	32,94	0	0,986	141,8	9,83	0	113,7
8,719	175,8	197,6	21,8	176,1	2500	46	32,94	0	0,988	141,1	9,82	0	113,7
8,751	175,8	197,6	21,8	176,1	2501	46	32,94	0	0,988	141,1	9,82	0	113,7
8,782	176,6	198,4	21,8	176,1	2501	46,2	32,94	0	0,988	141,4	9,83	0	114
8,813	176,6	198,4	21,8	176,1	2496	46,2	32,88	0	0,988	141,4	9,83	0	114
8,86	176,2	198	21,8	176,1	2496	46	32,88	0	0,99	142,2	9,82	0	114
8,891	176,2	198	21,8	176,1	2498	46	32,79	0	0,99	142,2	9,82	0	114
8,922	175,4	197,2	21,8	176,1	2498	45,8	32,79	0	0,991	141,7	9,77	0	114
8,954	175,4	197,2	21,8	176,1	2495	45,8	32,88	0	0,991	141,7	9,77	0	114
8,985	176,6	198,4	21,8	176,1	2495	46,1	32,88	0	0,991	142,7	9,8	0	114
9,016	176,6	198,4	21,8	176,1	2496	46,1	32,65	0	0,991	142,7	9,8	0	114
9,063	174,2	196	21,8	176,1	2496	45,4	32,65	0	0,993	141,1	9,77	0	114
9,079	174,2	196	21,8	176,1	2495	45,4	32,79	0	0,993	141,1	9,77	0	114
9,126	175,4	197,2	21,8	176,1	2495	45,8	32,79	0	0,993	142,2	9,77	0	114
9,157	175,4	197,2	21,8	176,1	2492	45,8	32,72	0	0,993	142,2	9,77	0	114
9,188	175	196,8	21,8	176,1	2492	45,7	32,72	0	0,992	141,7	9,77	0	112,7
9,219	175	196,8	21,8	176,1	2491	45,7	33,01	0	0,992	141,7	9,77	0	112,7
9,266	175,8	197,6	21,8	177,6	2491	45,8	33,01	0	0,989	141,3	9,77	0	113,7
9,282	175,8	197,6	21,8	177,6	2489	45,8	32,86	0	0,989	141,3	9,77	0	113,7
9,329	175,8	197,6	21,8	176,1	2489	45,8	32,86	0	0,989	141,6	9,77	0	114
9,36	175,8	197,6	21,8	176,1	2494	45,8	32,88	0	0,989	141,6	9,77	0	114
9,391	175,4	197,2	21,8	176,1	2494	45,8	32,88	0	0,988	141,3	9,8	0	114
9,422	175,4	197,2	21,8	176,1	2494	45,8	33,07	0	0,988	141,3	9,8	0	114
9,469	176,6	198,4	21,8	176,1	2494	46,1	33,07	0	0,988	142,3	9,83	0	114
9,485	176,6	198,4	21,8	176,1	2494	46,1	32,74	0	0,988	142,3	9,83	0	114
9,532	176,6	198,4	21,8	176,1	2494	46,1	32,74	0	0,991	142,7	9,77	0	114
9,563	176,6	198,4	21,8	176,1	2494	46,1	32,95	0	0,991	142,7	9,77	0	114
9,594	175,4	197,2	21,8	176,1	2494	45,7	32,95	0	0,991	141,4	9,82	0	114
9,626	175,4	197,2	21,8	176,1	2492	45,7	32,64	0	0,991	141,4	9,82	0	114
9,657	175,4	197,2	21,8	176,1	2492	45,7	32,64	0	0,991	141,8	9,77	0	114

9,688	175,4	197,2	21,8	176,1	2492	45,7	32,65	0	0,991	141,8	9,77	0	114
9,735	174,2	196	21,8	176,1	2492	45,4	32,65	0	0,993	141	9,77	0	114
9,766	174,2	196	21,8	176,1	2494	45,4	32,85	0	0,993	141	9,77	0	114
9,797	173,8	195,6	21,8	176,1	2494	45,4	32,85	0	0,993	141,1	9,77	0	114
9,829	173,8	195,6	21,8	176,1	2491	45,4	32,6	0	0,993	141,1	9,77	0	114
9,86	174,6	196,4	21,8	176,1	2491	45,5	32,6	0	0,996	141,6	9,72	0	114
9,891	174,6	196,4	21,8	176,1	2488	45,5	32,72	0	0,996	141,6	9,72	0	114
9,938	175,4	197,2	21,8	178,2	2488	45,6	32,72	0	0,998	141,5	9,71	0	114
9,969	175,4	197,2	21,8	178,2	2488	45,6	32,88	0	0,998	141,5	9,71	0	114
10,00 1	175,4	197,2	21,8	176,4	2488	45,6	32,88	0	0,998	142,2	9,75	0	114

**Приложение К**  
**(Обязательное)**

Таблица 1 - Результаты испытаний двигателя в базовом варианте на природном газе

n, об/мин	Pe, МПа	Gв, кг/ч	Gпрг, м <sup>3</sup> /ч	Q, МДж/ч	УОЗ	λ <sub>meta</sub>	λ <sub>nsk</sub>	МЕТА					ГА			
								O2, %	CO, %	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	O2, %	CO, %	NOx, ppm	CO2,%
850	0	7,7	0,852	30,513	25	1,04	1,05	1,67	1,27	150	140	12				
		7,6	0,724	25,909	32	1,2	1,19	3,55	0,22	130	260	11,4				
		8,3	0,690	24,712	32	1,315	1,32	5,27	0,22	80	140	10,7				
		9,2	0,679	24,298	32	1,44	1,48	6,55	0,19	120	70	9,77				
		10,4	0,698	24,989	32	1,61	1,73	8,57	0,19	140	40	8,78				
		10,6	0,739	26,462	32	1,59		8,43	0,26	230	50	9,15				
1380	0	13,1	1,348	48,259	33	1,09	1,07	1,78	0,37	0	530	11,2	1,3	0,41	410	12
		17,1	1,212	43,401	35	1,49	1,49	6,67	0,14	100	170	8,96	6,8	0,04	97	7,8
		19,2	1,212	43,401	38	1,67	1,69	8,19	0,15	230	70	7,85	8,6	0,06	30	6,9
		21,2	1,285	46,017	42	1,90	1,97	9,83	0,16	320	60	6,93	10,3	0,06	19	5,9
2185	0.19	32	3,920	140,322	32	0,98	1,01	2,4	3,88	70	430	10,2	0,2		226	11,5
		32,3	3,292	117,837	32	1,05	1,01	2	1,26	20	1380	12,2	0,2		1283	11,6
		34,4	3,093	110,737	30	1,19	1,13	3,45	0,27	0	1780	11,7	2,4		1789	10,4
		37,2	2,968	106,240	32	1,31	1,26	5,08	0,26	10	1410	10,8	4,3		1350	9,3
		39,5	2,885	103,282	35	1,42	1,40	6,53	0,26	0	930	10,2	6		804	8,3
		43,2	2,855	102,216	40	1,55	1,56	7,85	0,25	20	570	9,36	7,5	0,29	465	7,6
		46,2	2,796	100,086	47	1,64	1,73	8,9	0,23	70	430	9,01	8,8		320	6,8
		50	2,825	101,151	52	1,78	1,94	9,94	0,29	180	240	8,32	10	0,17	161	6
2185	0.2	57,4	2,978	106,595	52	1,97	2,27	11,4	0,3	330	120	7,31	11,8	0,17	57	5,2
		34	3,434	122,926	27	1,14	1,05	2,1	0,11	70	1380	10,2	1,2	0,19	1305	11
		39,3	3,100	110,974	38	1,41	1,33	5,41	0,06	60	1690	8,93	5,2	0,05	1646	8,8
		45	2,994	107,187	38	1,73	1,62	8,1	0,07	140	320	7,46	8	0,06	233	7,2
3277	0.33	53	3,044	108,962	50	2,06	1,99	10,2	0,06	260	150	6,24	10,4	0,07	96	5,9
		62,8	7,102	254,245	30	1,00	1,01	1,27	2	0	1340	9,92	0,6		1336	11,5
		67,3	6,497	232,592	27	1,16	1,07	2,32	0	0	2180	10,4	1,4		2260	10,9
		71	6,175	221,055	35	1,29	1,20	3,96	0	0	2870	9,62	3,5		3021	9,7
		77	5,952	213,069	38	1,43	1,32	5,51	0	0	2200	8,82	5,1		2184	8,8

		81,6	5,852	209,519	38	1,60	1,48	7,12	0	0	960	8,08	6,8		779	7,9
		92	5,743	205,614	55	1,83	1,71	8,79	0	0	670	7,29	8,7		563	6,9
		100	5,803	207,744	55	1,98	1,87	9,89	0	80	330	6,84	9,8	0,05	232	6,2
		110	6,200	221,943	55	2,31	2,11	11,3	0	220	200	5,72	11,2		117	5,5

## Продолжение приложения К

Таблица 2 - Результаты испытаний двигателя при добавке синтез газа к основному топливу

n, об/мин	Pе, МПа	G <sub>прг</sub> , ГСГ, м <sup>3</sup> /ч	Gв, кг/ч	G <sub>прг</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Qsigma, МДж/ч	УОЗ	λ <sub>meta</sub>	λ <sub>nsk</sub>	МЕТА					ГА			
									O2, %	CO, %	CH, ppm	Nox, ppm	CO2, %	O2, %	CO, %	Nox, ppm	CO2,%
850	0	0,626	9,4	0,694	47,261	30	1		3,1	4,76	620	20	6,88				
			7,65	0,418	37,364	27	0,98		1,1	3,74	360	20	8,42				
			7,4	0,317	33,773	27	0,98		1	2,97	250	30	8,86				
			7	0,253	31,471	27	1,01		1	2,34	250	40	9,43				
			6,5	0,094	25,770	32	1,08	1,06	1,3	0,85	210	80	10,1				
			7,2	0,084	25,417	32	1,23	1,18	3,2	0,13	140	120	9,67				
			8,4	0,081	25,298	32	1,46	1,38	5,7	0,12	130	40	8,39				
2185	0.19	1,614	32,3	1,382	107,257	27	1,18	1,17	3,64	0,4	0	1020	12,3	3,1	0,24	934	9,9
			36	1,262	102,957	30	1,33	1,37	5,72	0,39	0	580	11,1	5,6	0,2	413	8,6
			44,1	1,211	101,123	35	1,58	1,74	8,5	0,4	0	130	9,48	8,9	0,26	64	6,8
			50	1,159	99,289	40	1,73	2,01	9,93	0,53	0	60	8,56	10,5	0,38	22	5,8
3277	0.33	2,546	62	3,869	229,672	27	1,17	1,12	2,5	0,07	0	1270	10,5	2,3		1161	10,4
			67,3	3,592	219,733	32	1,28	1,24	4,14	0,09	0	1390	9,75	3,8		1200	9,6
			75	3,503	216,538	35	1,46	1,38	6	0,08	0	760	9,07	5,8		493	8,5
			84,1	3,294	209,084	37	1,67	1,6	8	0,08	0	220	8,03	7,9		142	7,3
			90,6	3,208	206,008	48	1,8	1,76	9,01	0,15	0	200	7,54	9	0,10	138	6,7
			102	3,209	206,022	48	2,07	2,05	10,5	0,2	0	70	6,5	10,6	0,28	27	5,7
			115	3,435	214,105	60	2,29	2,43	12	0,39	60	40	5,85	12,3	0,54	17	4,9

## Продолжение приложения К

Таблица 3 - Результаты испытаний двигателя при его работе на синтез газе

n, об/мин	Pе, МПа	Gв, кг/ч	G <sub>прг. ГСГ</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Qsigma, МДж/ч	УОЗ	λ <sub>meta</sub>	λ <sub>nsk</sub>	МЕТА					ГА			
								O2, %	CO, %	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	O2, %	CO, %	NOx, ppm	CO2,%
850	0	5,3	0,9706	34,747	25	1,04		1,14	0,65	170	40	10,5				
		5,2	0,935	33,473	25	1,04	1,03	1,28	0,67	290	50	10,8				
		7,6	0,865	30,967	25	1,40	1,37	5,62	0,23	240	20	8,79				
		14,6	0,8307	29,739	50	2,32	2,46	11,8	0,49	270	10	5,22				
		16,2	0,865	30,967	50	2,41	2,68	12,4	0,54	310	10	5,05				
		21,3	0,935	33,473	60	2,72	3,32	13,9	0,77	380	10	4,23				
		23,5	0,9706	34,747	60	2,83	3,54	14,2	0,81	440	10	3,94				
1380	0	14,4	1,394	49,905	40	1,44	1,45	6,19	0,26	0	50	9,19	6,4	0,19	17	8,1
		14,7	1,384	49,547	30	1,51	1,49	6,74	0,26	0	30	8,71	6,9	0,16	10	7,8
		21,9	1,357	48,581	32	2,06	2,15	10,7	0,44	0	20	6,34	11,2	0,42	3	5,4
		24,9	1,314	47,041	52	2,31	2,52	12,5	0,56	10	20	5,82	12,4	0,56	4	4,7
		25,3	1,314	47,041	52	2,30	2,58	12,2	0,56	50	20	5,65	12,8	0,70	3	4,5
		28	1,394	49,905	52	2,35	2,75	12,6	0,83	80	20	5,25	13,3		4	4,3
2185	0.2	28,5	3,475	124,405	25	1,21	1,17	3,36	0,19	40	610	10,5	3,2	0,13	438	9,9
		46,2	3,218	115,204	40	1,84	1,83	9,2	0,26	0	70	7,23	9,5	0,21	27	6,4
		59	3,2	114,560	38	2,25	2,35	11,6	0,44	0	30	5,81	12	0,50	9	5
		75	3,218	115,204	55	2,67	2,99	13,3	0,66	20	30	4,65	14	0,89	9	3,9
		78	3,475	124,405	55	2,73	3,17	13,7	0,77	100	50	4,4	14,3		15	3,7

## Продолжение приложения К

Таблица 4 - Параметры работы ГСГ

п, 1/мин	Ре, МПа	Ротамер, дел	Р_ман, дел.	G <sub>прг_гсг</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Протерм, дел.	G <sub>в_гсг</sub> , м <sup>3</sup> /ч	T1	T2	СОсг,%	H2, %	
850	0	15	7	0.627	205	1.752	547	840	7.5	26.4	
850	0	25	16	0,971	380	3,001	866	564	8	26,6	
		24	15	0,935	350	2,769	867	597	9	28,4	
		22	13	0,865	323	2,567	865	590	8,5	27,6	
		21	12	0,831	309	2,465	858	585	8,4	27,6	
		22	13	0,865	323	2,567	865	590	8,5	27,6	
		24	15	0,935	350	2,769	867	597	9	28,4	
		25	16	0,971	380	3,001	866	564	8	26,6	
1380	0	37	25	1,394	517	4,150	906	617	9,5	27,4	
		37	21,5	1,385	485	3,868	890	610	9,3	27,5	
		36	24	1,357	506	4,052	888	609	9,4	27,8	
		35	20	1,314	476	3,791	902	615	9,5	28,1	
		35	20	1,314	476	3,791	902	615	9,5	28,1	
		37	25	1,394	517	4,150	903	618	9,5	28,1	
2185	0.19	43	31	1.614	868	4.616	868	635	10.5	29.1	
2185	0.2	82	140	3,475	1080	10,449	700	730	11,4	30	
		79	109	3,218	1012	9,554	756	702	11,7	30,2	
				3.21							
		79	109	3,218	1012	9,554	756	702	11,7	30,2	
		82	140	3,475	1080	10,449	700	730	11,4	30	
3277	0.33	62	105	2.546	1028	9.761	887	838	11.7	25.3	