

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

### 13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

## Энергетические комплексы и системы управления

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему Совершенствование рабочего процесса газо-поршневых установок

Студент

Н.Н. Гапченко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

# Научный

А.М. Дзюбан

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

# Консультант

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

## Руководитель программы

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

«            »            2018 г.

## Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

«            »            2018 г.

# Тольятти 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Природный газ в двигателе автомобиля.....	6
2 Контроль над выбросами токсичных веществ.....	9
2.1 Выбросы СО.....	9
2.2 Выбросы СН.....	9
3 Способы снижения выбросов в атмосферу.....	16
3.1 Варианты снижения выбросов СН и СО.....	16
3.2 Варианты снижения выбросов NO.....	21
4 Алгоритм проведения и анализ результатов проведенных испытаний.....	24
4.1 Предмет и условия испытаний.....	24
4.2 Измерительное оборудование.....	26
4.3 План проведения лабораторных испытаний.....	28
4.4 Взаимосвязи используемые при анализе результатов испытаний.....	29
4.5 Погрешности показателей измерений.....	29
4.6 Результат измерения и оценка его среднего квадратического отклонения.....	31
5 Результаты лабораторных исследований и их анализ.....	36
5.1 Регулирование состава смеси.....	36
5.2 Управление нагрузкой.....	42
5.3 Управление режимами с помощью УОЗ.....	48
5.4 Токсичность силового агрегата при использовании водорода.....	51
6 Способы улучшения показателей газового двигателя и рекомендации к добавлению водорода.....	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	68
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	71

## ВВЕДЕНИЕ

За последнее время, снижение выбросов в атмосферу токсичными веществами, выделяемыми промышленными предприятиями и автомобильным транспортом, является одной из самых главных задач, для всех промышленно развитых стран. Загрязнение атмосферы оказывает вреднейшее воздействие не только на человека, животных, растения, воду, климат ... Урон, приносимый загрязнением в атмосферу, трудно подсчитать, так как для этого необходима полная информация от различных предприятий и других отраслей народного хозяйства страны.

Снизить объем выбросов отравляющих веществ в атмосферу безусловно возможно путем внедрения и использования других видов топлива.

Использование иного вида топлива способствует изучению иных физических и химических свойств, а также развитие и применение разнообразных видов присадок.

Проводимые ранее исследования очень мало публикуются в прессе. Расследование проблемы только в одном направлении, с помощью химической кинетики не могло объяснить все открытые вопросы, которые касаются не только рабочих циклов двигателя, но и добычания водорода, его переработки, использовании и хранении инновационного вида топлива. Так, например, представленные схемы не позволяют в полном объеме изучить характеристики рабочей смеси при их использовании в качестве инновационного вида топлива, что вызвано нестабильным хим. составом традиционного топлива.

Переоборудование силового агрегата под альтернативное, водородосодержащее топливо влечет за собой внедрение сложного социально-экономического процесса, для реализации которого необходима крупнейшая модернизация определенных отраслей промышленности (добыча, переработка, реализация через АЗС...).

Минимальная освещённость и доступность информации в литературе о характеристиках сгорания углеводородного топлива с добавлением в дизельную установку водорода, не позволяет определенно полно ответить на

возникающие вопросы о влиянии и воздействия водородосодержащего топлива на изменяющиеся характеристики, проходящие в результате рабочих процессов (такты) в цилиндрах дизельной установки.

Основная цель, полноценно провести анализ и рассмотреть особенности в процессах при работе дизельной установки с использованием возможности добавления водорода к основному топливу. Обладая полученной информации из дополнительных источников (литература и интернет), об объемном распространении зоны концентрации сажи и температуры и по результатам проведенного анализа установлено, что существующие конструкции силовых агрегатов основаны в основном на двухмерной температурно-концентрационной неоднородности топливной смеси в цилиндре дизельной установки.

Для анализа и подтверждения полученной информации была определена цель: провести изучение объемного распространения зон температуры и основной концентрации образования и отложения сажи в камере сгорания дизельного силового агрегата, а также на поршне и стенке крышки головки блока.

При проведении исследования был взят четырехтактный двигатель, а/м КамАЗ-820.52-260 (КамАЗ-820.53-260) с принудительным искровым зажиганием, микропроцессорным блоком управления (М 20) и системой впрыском сжатого природного газа V-8.

На этапе подготовки к выполнению работ был проведен предметный обзор соответствующей литературы и на основе характеристик выбранного двигателя, оценена практическая возможность проведения опыта по методике работ кафедры «Энергетические машины и системы управления» ТГУ. Данная методика была разработана на полученных исследовательских работах поршневых ДВС на бензоводородных смесях. Эти работы направлены на экспериментальные исследования по влиянию добавления водорода к основному топливу, после чего выполнен аналитический анализ полученных результатов.

По результатам исследований, показана и оценена эффективность добавок водорода, получены показатели потребного расхода водорода, близких к эксплуатационным для силового агрегата автомобиля (КамАЗ-820.53-260), наработан способ получения водорода и составлено техническое задание для изготовления необходимого автономного генератора водорода.

После сгорания дизельного топлива образуется сажа. Сажа, как правило, представляет собой дисперсный углеродный продукт неполного сгорания, в виде сферических частиц черного цвета, состоящий в основном из углерода. В составе сажи так же содержится от 1 до 3 % водорода.

Ее образование происходит при высокой температуре более 1500° С, в результате объемного процесса термического разложения углеводородов при максимальном дефиците кислорода. Данную реакцию между продуктами пиролиза (термическое разложение органических и многих неорганических соединений).

Для сравнительного анализа предоставим результаты лабораторных исследований двух разных рабочих процесса в дизельной силовой установке: в первом варианте используем стандартное дизельное топливо и второй вариант с добавлением водорода к дизельному топливу и стандартную систему питания дизельного двигателя. Проведение сравнительного анализа позволили определить возможность снижения расхода дизельного топлива и уменьшить выделение токсичных элементов в окружающую среду и атмосферу, а также удостовериться в теоретических исследовательских расчетах, представленных в данной работе.

В отчёт внесены результаты аналитического обзора литературы по применению природного газа в силовой агрегат автомобиля, причины образования токсичных компонентов в выхлопных газах, методы их снижения с обоснованием выбора того или иного способа, а также результаты лабораторных исследований, на основании которых определен облик системы добавления водорода и конкретные характеристики генератора водорода (водородосодержащего газа).

## 1 Природный газ в двигателе автомобиля

Силовой агрегат, работающий на природном газе (ПГ) характеризуется относительно низкой составляющей окиси углерода, углеводородов и прочих твердых частиц. Метан в количестве 85% - 95% является одним из основных компонентов который входят в состав природного газа. Прочие составляющие компоненты - это сложные углеводороды (вода и азот). Благодаря малой молекулярной массе метана, при его сгорании можно добиться низкого процента концентрации токсичных веществ. При сгорании природного газа, в выхлопных газах содержатся только четыре основных компонента: азот (N), водяной пар, избыточный кислород и окись углерода.

При не догорании топливной смеси в силовом агрегате, в атмосферу выбрасываются не только отработанные газы, но и несгоревшие остатки частично окисленного топлива и твердые частицы от моторного масла, которые попали в камеру сгорания.

Процесс сгорания природного газа приносит в окружающую среду наибольшую долю загрязнений, путем выброса остатков несгоревшего метана. К выбросам остатков метана, приводит несоблюдение баланса пропорций в топливовоздушной смеси, а также плохое смешивание компонентов смеси. Нужно отметить, что по химическому воздействию отработанные газы с содержанием остатков метана менее активны, в отличие от газов, содержащих тяжелые углеводороды.

Состав молекулы метана – это один атом углерода и четыре атома водорода, что является низким соотношением, по сравнению с остальными видами топлива. Из-за низкого уровня выбросов CO и CO<sup>2</sup>, природный газ называют топливом «обедненным углеродом». У силовых установок, работающих на смеси природного газа, эмиссия CO<sup>2</sup> выше, чем у силовых установок, работающих на обедненной смеси, но ниже чем у установок, работающих на бензиновом или дизельном топливе. Незначительное количество серы добавляется в природный газ для придания ему запаха, чтобы

определить его утечку при разгерметизации топливной системы. Одним из продуктов сгорания является сера и ее окись.

Силовые агрегаты, использующие природный газ, имеют более высокий коэффициент полезного действия (КПД), чем силовые агрегаты, работающие только на одном бензине. КПД силового агрегата, откалиброванного на сгорание бедной смеси можно приравнять к КПД дизельного силового агрегата. У природного газа основным компонентом является метан. Его октановое число примерно равно 120 – 130, (из лабораторных исследований). По таким характеристикам можно кардинально увеличить степень сжатия в силовом агрегате.

Вовремя использования природного газа, меняются в лучшую сторону характеристики «холодного пуска» силового агрегата из-за улучшения смесеобразования и распределения топливной смеси в камере сгорания (лучшая испаряемость, чем у углеводородного топлива).

Основной проблемой использования природного газа, является размещение его запаса на автомобиле. Для того чтобы хранить ПГ в жидком состоянии, требуются низкие температуры ( $T = 126^{\circ}\text{C}$  при атмосферном давлении). Поэтому лучшие перспективы имеет применение в качестве топлива сжатого природного газа.

Температура воспламенения природного газа приблизительно равна  $648^{\circ}\text{C}$ , это выше, чем температура вспышки бензина ( $250^{\circ} - 300^{\circ}\text{C}$ ). Данная особенность снижает риск случайного самовоспламенения и возгорания автомобиля. Основным требованием при эксплуатации автомобиля, работающего на природном газе - это его хранение в гараже, оборудованного системой вентиляции или на открытой парковке (на улице).

Состав природного газа приведён в таблице 1.1.

Таблица 1.1 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



## 2 Контроль над выбросами токсичных веществ

Вовремя сгорания топливной смеси в цилиндре силовой установки, образуется достаточно большое разнообразие химически активных веществ. Их степень воздействия на окружающую среду разнообразна. Из всего многообразия выделяемых веществ, можно выделить основные, такие как: окись углерода (CO), углеводороды (CH), окислы азота (NO<sub>x</sub>), и конечно сажа.

### 2.1 Выбросы CO

«Окись углерода (угарный газ) – продукт неполного сгорания топливной смеси, главным фактором имеющим значение для окружающей среды - является коэффициент избытка воздуха.

Чтобы воздействовать на концентрацию CO в отработанных газах необходимо контролировать коэффициент избытка воздуха, который должен немного превышать стехиометрический состав. При условии, если состав топливной смеси будет  $\alpha < 1$  то это приведет к неполной химической реакции из-за чего будет происходить увеличение объемов выброса углекислого газа в окружающую среду.

Для поршневых силовых агрегатов (искровое зажигание на углеводородном топливе) самый оптимальный состав топливовоздушной смеси находится в пределах  $\alpha = 1,05 \div 1,2$ . Для всех других силовых установок, работающих на газовом топливе или метане, необходимое значение будет выше  $\alpha = 1,15 \div 1,25$ . Изменения в сторону увеличения  $\alpha$ , более 1,25 приводит к увеличению объема выбросов углекислого газа из-за не догорания топливной смеси. Необходимо отметить, что концентрация выбросов углекислого газа не соответствует сбалансированному состоянию, вследствие максимально высокой температуры отработанных выхлопных газов [6, 10].

### 2.2 Выбросы CH

Причино-следственная связь в образовании и выделении углеводорода (CH) в отработанных газах помогла определить несколько самых значимых

источников этих образований, т.е несгоревшие компоненты в цилиндрах силовой установки. К таким веществам нужно отнести:

- объемные углеводороды;
- замороженные слои;
- объемы гашения.

#### Объемные углеводороды

«Фактором, влияющим на образование объемных углеводородов, является его состав топливовоздушной смеси (ТС), которая определяется коэффициентом переизбытка воздуха  $\alpha$ . На графике рисунка 2.1 приведены значения характеристик зависимости изменения концентрации токсичных компонентов» [29] в отработанных газах современных бензиновых соловых агрегатов от  $\alpha$ . Из графика рисунка 2.1 видно, что минимальное значение углеводорода соответствует значению  $\alpha \approx 1,1-1,2$ .

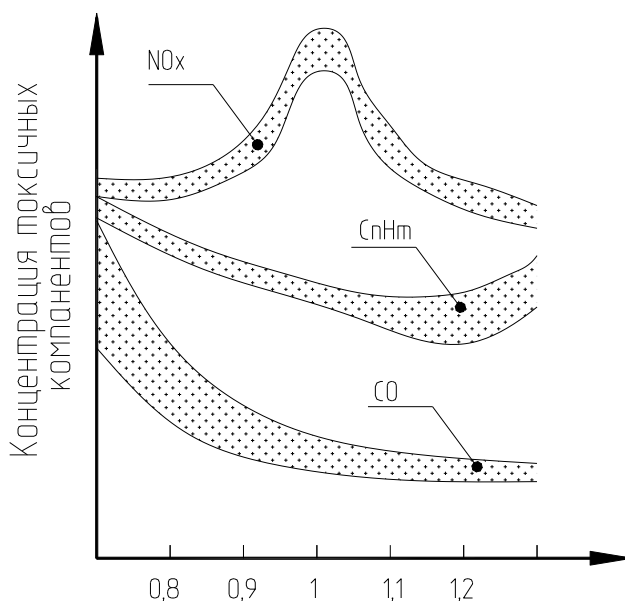


Рисунок 2.1 - Показатели концентрации токсичных компонентов.

При  $\alpha < 1$  большое количество углеводородов, выбрасываемые вместе с выхлопными газами получаются из-за отсутствия точных настроек (калибровок) под конкретное топливо для организации полного его сгорания с помощью окислителей. Весь процесс сгорания топливно-воздушной можно наблюдать по изменению коэффициента горения, который можно записать в виде следующей формулы:

$$\mu = M_2/M_1,$$

где  $M_1$  – объем горючей смеси,

$M_2$  – количество веществ полного сгорания

«Для наглядности рассмотрим пример свойственного изменения коэффициента молекулярного изменения в зависимости от состава смеси, для варианта с использованием только бензина в качестве топлива представлено на рисунке 2.2. Похожая ситуация возможна и для коэффициента молекулярного изменения метана. Изменение свойств углеводорода при  $\alpha > 1.2$  связано с изменением, в сторону ухудшения сгорания топлива из-за приближения»[29] к показателям границ равномерного горения. Таким образом можно сделать следующий вывод: для того чтобы уменьшить показатели выбросов объемных углеводородов ( $CH$ ), необходимо добиться устойчивой работы двигателя на всех режимах (пуск, прогрев...) при  $\alpha \cong 1$  и не немного выше.

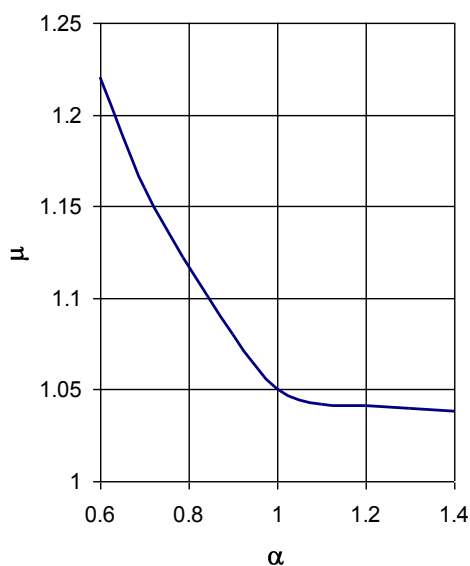
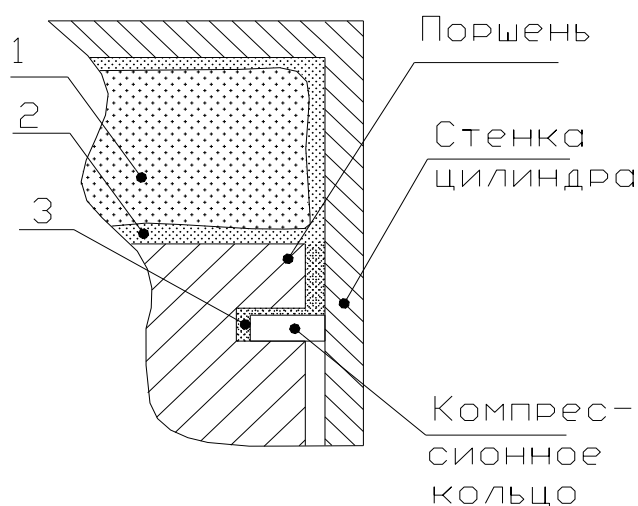


Рисунок 2.1 - Зависимость молекулярного коэффициента от коэффициента избытка воздуха



1- источник объемных СН. 2- замороженные слои. 3- объемы гашения  
Рисунок 2. 3 - Схема поршневого узла в цилиндре.

### Замороженные слои

«Отложения замороженных слоев на стенках цилиндра силового агрегата были зафиксированы с помощью фотографирования. На фотографии можно заметить незначительное свечение пламени около стенки цилиндра. Схема расположения замороженных слоев приведена на рисунке 2.3. Изучение процесса сгорания топлива в камере, позволило определить объем зоны в которой происходит гашение пламени» [29]. «Эти значения находятся в пределах 0,15 - 0,38 мм. По результатам наблюдения было установлено, что основным условием для воздействия на объем зоны гашения, замороженного слоя [28], является воздействие температуры и давления. Так, при температуре стенки цилиндра силового агрегата  $T_{ст} > 95^{\circ} \text{C}$ , количество углеводорода, выделенного при сгорании топливной смеси, «и направленного на замороженные слои составит не более 5- 7%. И наоборот, при снижении температуры стенки цилиндра, доля углеводорода, выделенная на замороженные слои, кардинально увеличится» [29]. Примером этому может служить снижение температуры стенки цилиндра силового агрегата с  $185^{\circ} \text{C}$  до  $65^{\circ} \text{C}$ , в данном случае возрастает (примерно в два раза) концентрация углеводорода в выбросах отработанных газов.

Зависимость толщины замороженного слоя от температуры и давления определяется с помощью соответствующих опытов. По полученным данным их можно записать в виде формулы:

$$q \approx q_r P_r P^\psi T_r T^\gamma,$$

где  $q$  – толщина замороженного слоя;

$T$  и  $P$  – температура и давление;

$\psi$  и  $\gamma$  – эмпирические коэффициенты;

индекс  $r$  показывает граничные условия.

Формула 2.2 имеет ряд недостатков, к примеру, для ее использования нужно иметь значения коэффициентов  $\psi$  и  $\gamma$ , для получения которых необходимо провести ряд сложных экспериментов. Упростить задачу и исправить недостатки формулы (1.2) позволяет приведенная ниже формула:

$$d_{кр}^2 = \frac{F \cdot A \cdot \beta \cdot \chi \cdot X_f}{c_p \cdot \pi \cdot \varpi},$$

где  $F$  – постоянная, определяет отношение скорости реакции во время прохождения пламени, к скорости реакции, необходимая в самой зоне реакции, чтобы собственно произошло распространение пламени;

$X_f$  – мольная доля в топливе;

$c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении.

Тем не менее, с помощью данной формулы не получится произвести расчет в полной мере, т.к. входящие величины недостаточно точные.

#### Объемы гашения

Маленькие зазоры, препятствующие свободному распространению пламени, также являются источниками несгоревших углеводородов.

Проведенные исследования показали, что большая часть массы углеводородов, образующихся в объемах гашения приходится на часть поверхности первого поршневого кольца (см. рисунок 2.3). Количество образующихся веществ в объемах гашения углеводорода можно представить в виде эмпирической зависимости

$$m = VFS(P, T) (1 + F),$$

где  $V$  - объем зазора, в котором происходит гашение пламени;

$F$  - Отношение, воздух/топливо;

$S$  - Плотность.

При этом минимальный размер рабочего зазора, в котором происходит гашение пламени, можно найти по формуле[28]:

$$d_{кр} = \frac{12 \cdot T_F^2}{298^2 \cdot N_f} \cdot \frac{i_{mol}}{k_{cp}} \cdot \frac{1}{\frac{P_H}{D_H} + \frac{P_O}{D_O} + \frac{P_{OH}}{D_{OH}}},$$

где  $T_F$  - равновесная адиабатная температура пламени;

$N_f$  - число молекул топлива в единице объема;

$k_{cp}$  - средняя константа скорости реакции активных частиц с молекулами топлива;

$i_{mol}$  - часть молекул, присутствующих в газовой фазе, которые должны реагировать для того, чтобы пламя распространялось;

$P$  - парциальные давления соответственно  $H$ ,  $O$  и  $OH$ ;

$D$  - Коэффициенты диффузии соответственно  $H$ ,  $O$  и  $OH$ .

Из формул (2.4) и (2.5) видно, что  $m_{CH}$  зависит от плотности, температуры и концентрации активных веществ.

Можно отметить, что на объем выбросов углеводорода также влияет шероховатость поверхности (чистота механической обработки) поршня, головки блока цилиндров и нагар в камере сгорания, образующийся при эксплуатации силового агрегата. Повышенная шероховатость на деталях способствует образованию на них отложений и как следствие увеличивают выбросы  $CH$ .

Количество выбросов  $CH$  на выходе можно записать как:

$$CH = CH_\alpha + CH_{3,c} + CH_{o,r},$$

где  $CH_\Sigma$  - суммарное количество несгоревших углеводородов на выходе из цилиндра;

$CH_\alpha$  - количество углеводородов образованных вследствие неполноты реакции сгорания;

$CH_{з.с.}$  - количество углеводородов, приходящихся на замороженные слои;

$CH_{о.г.}$  - количество углеводородов, приходящихся на объемы гашения.

От условий и режима работы силового агрегата, количественные показатели отдельных членов левой части выражения (2.6) изменяются в больших пределах и, следовательно, определяют суммарное количество выбрасываемых углеводородов.

#### Образование и выбросы окислов азота NO

Окислы азота NO образуются при сгорании топливной смеси в воздухе при высоких температурах и давлении. При этом, вступая в реакцию с кислородом, образуя окись азота NO и небольшое количество двуокиси NO<sub>2</sub>. Окисление азота происходит при температуре более 1500°C. С повышением температуры, растёт скорость реакции.

«Опираясь на общепринятую теорию Я.Б. Зельдовича, скорость образования окиси азота определяется максимальной температурой в зоне реакций, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химических свойств топлива, состояния и материала стенок камеры сгорания» [18].

«Образование окиси азота NO<sub>x</sub> происходит при резко изменяющихся показателях температуре и давлении. При росте температуры газов выше 2480° скорость реакции окиси азота менее  $5 \cdot 10^{-3}$ с, что значительно меньше продолжительности цикла» [29]. Этим и объясняется протекание реакции в термодинамическом равновесии. И, наоборот, с уменьшением температуры газов, время реакции увеличивается и превышает длительность цикла из-за чего термодинамическое равновесие нарушается, при этом происходит замораживание газов.

Исходя из вышеизложенного можно сделать определенный вывод: для снижения выбросов NO<sub>x</sub>, необходимо снижать температуру в цилиндре силового агрегата.

### 3 Способы снижения выбросов в атмосферу

При сгорании топлива, у углеводорода появляется множество химических соединений, нормируемая часть - это продукты частичного окисления и разложения ( $\text{CO}$  и  $\text{CH}$ ), имеющие различные химические свойства и строение, а также окислы азота  $\text{NO}_x$ . Последние образуются вне зависимости от вида и свойств топлива, которое было использовано [19]. Так как механизм горения достаточно сложный, то и токсичные продукты, появляющиеся в результате сгорания топлива в цилиндре силового агрегата, рассматривают только по тем факторам, от которых зависят их условия.

#### 3.1 Варианты снижения выбросов $\text{CH}$ и $\text{CO}$

Путем проведения опытов стало известно, что увеличение степени сжатия способствует повышению количества выбросов углеводорода [13]. Разберем два фактора, от которых зависят данные изменения:

- изменение отношения  $V$  камеры сгорания к  $S$  камеры сгорания;
- повышение плотности  $\text{CH}$  в  $V$  гашения.

Изменение данного отношения ведет к изменению теплового потока от газов в стенки цилиндров, как следствие – изменение параметров толщины замороженного слоя (пристенка). Соответственно необходимо увеличение температуры слоя пристенка. Существует множество способов увеличения температуры:

- снижение интенсивности теплового обмена между стенкой цилиндра и охлаждающей жидкостью,
- увеличение температуры охлаждающей жидкости,
- увеличение температуры отработанных газов путем уменьшения угла опережения зажигания,
- выбор необходимого материала цилиндра.

К хорошему росту выбросов углеводорода приводит наращивание плотности  $\text{CH}$  в объемах гашения, в первую очередь на участке первого



поршневого кольца. Для снижения данного фактора необходимо произвести данные мероприятия:

- Снизить  $V$  на участке первого поршневого кольца. Достаточно сделать зазор между зеркалом цилиндра и поршнем немного меньше, повысив точность при изготовлении, а также внимательно изучить влияние температуры на деформацию цилиндра и поршня при работе силового агрегата;

- Перенести первое поршневое кольцо к днищу поршня насколько это окажется возможным;

- Исключить возможность прорыва газов в масляный картер силового агрегата через поршневые кольца. Данный метод нежелателен для использования в силовом агрегате, в связи с огромным расходом масла, быстрого разрушения и снижения экономичности силового агрегата. Хочется отметить тот факт, что при работе с природным газом время службы масла значительно возрастает. А значит данный способ заслуживает внимания и проработки.

Известно, чтобы получить минимально возможные выбросы продуктов сгорания нужно использовать стехиометрический состав смеси или более бедный. Но практика показывает обратное и силовой агрегат, работающий при таких условиях, выбросит огромное количество углеводорода и углекислого газа также. Виной всему неравномерное распределения топливовоздушной смеси по цилиндрам силового агрегата, особенно для двигателей больших размеров [14]. Для того чтобы исключить образование в отдельных цилиндрах силового агрегата локальных областей, где возможно наличие разного состава смеси, как богатого, так и обедненного нужно:

- Увеличить  $V$  объем впускного ресивера;

- Использовать электронную систему управления впрыска топлива для каждой топливной форсунки с учетом режима и алгоритма работы силового агрегата на различных режимах;

- Повышение температуры ТВС, более применимо для жидкого топлива;

- Разделить впуск по цилиндрам для снижения колебаний воздушного потока в воздушном;

- Выбор подходящих размеров (диаметра и длины) впускных и выпускных каналов ДВС.

Внутренняя рециркуляция отработавших газов может привести к увеличению выбросов углеводорода и углекислого газа. Следовательно, для того чтобы снизить выработку вредных выбросов необходимо повысить коэффициента очистки цилиндра. Сделать качественную очистку цилиндра позволит увеличение степени сжатия в камере сгорания, но не стоит забывать, что данное увеличение способствует росту выбросов углеводорода.

Небольшое понижение выбросов продуктов неполного сгорания можно заметить, применив систему рециркуляции отработанных газов. Минусом данного метода станет ухудшение условий сгорания топливно-воздушной смеси.

Рост температуры выхлопных газов двигателя значительно снижает выбросы углекислого газа и углеводорода. Для того чтобы увеличить температуру выхлопных газов существует ряд способов: применение у выпускного коллектора термоизоляции, что приведет к снижению углеводорода до 20%. Важно не забывать, при повышении показателей степени сжатия снижается температура отработавших газов, в отличие от теплового КПД, который значительно увеличится. Процесс полного окисления продуктов неполного сгорания будет завершен при условии не только соблюдения нужного температурного режима, но также при достаточном по времени нахождении их при заданной температуре. Если на градуснике  $600^{\circ}\text{C}$  и более, то время нахождения не может быть меньше, чем 50мс. Следовательно, если выбранная температура ниже, тогда время нахождения должно увеличиться. Если показатели менее  $300^{\circ}\text{C}$ , то время, которое понадобится для окисления углекислого газа и углеводорода от 1 секунды и более.

Рассмотрим способ уменьшения выбросов продуктов неполного сгорания силового агрегата с искровым зажиганием в условиях работы на обедненных

смесях. Снижение происходит за счет использования угла опережения зажигания с меньшим значением. Это приведет к снижению выбросов на 20 % и более, путем переноса данного процесса в часть впуска и расширения. При значительном снижении угла опережения зажигания нужно быть готовым к большому расходу топлива. Однако данный способ заслуженно считается одним из наиболее действенных и достаточно простым по исполнению.

Более полного окисления продуктов неполного сгорания можно добиться путем снижения углекислого газа и углеводорода по средствам использования вторичного воздуха. На практике данный способ является достаточно простым при наличии наддува двигателя, эффективность данного способа еще усилится при работе силового агрегата на богатых смесях. Но стоит воспользоваться данным методом на бедной смеси, как его эффективность будет ничтожной. Данные использования добавки вторичного воздуха в отработанных газах представлены на рисунке 3.1.

Важно учитывать, что применение каталитических трехкомпонентных нейтрализаторов для силового агрегата, которые настроены на метан, будут ограничены по обезвреживанию легких углеводородов метановой группы. Соответственно нельзя отказаться от термических нейтрализаторов полностью. Передовые производители на современном рынке активно используют добавки вторичного воздуха с целью улучшения работы каталитических систем нейтрализации выхлопных газов в условиях режима пуск и прогрев силового агрегата. Подобная схема представлена на рисунке 3.2.

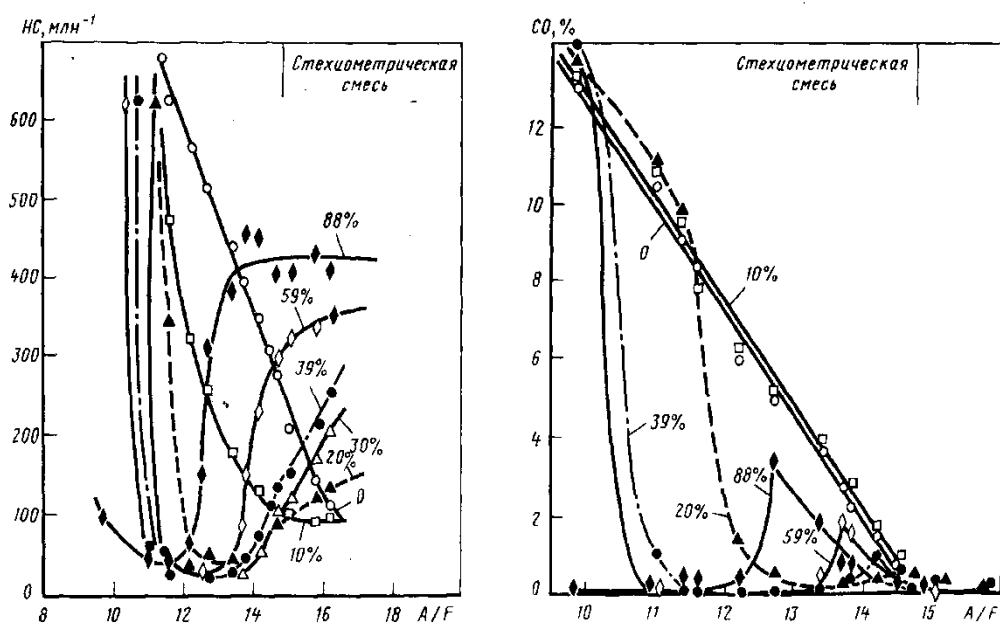
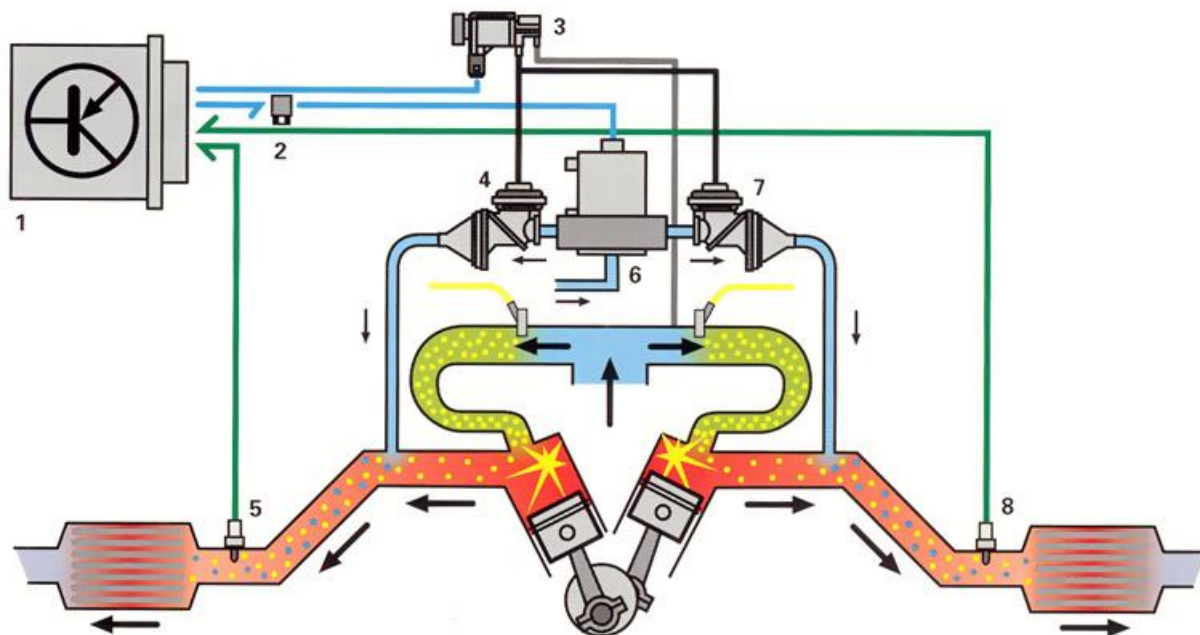


Рисунок 3.1—Зависимость количества воздуха к количеству топлива в топливовоздушной смеси.

Существует не менее эффективный способ, снижающий выбросы углеводорода и углекислого газа - это двухсвечная система зажигания. Применение в камере сгорания сразу две свечи поможет сделать процесс сгорания топливно-воздушной смеси оптимальным, усилив тем самым полноту сгорания. Данный метод хорошо применим для камер сгорания, обладающих немаленьким объемом. Примером служит известная марка Mercedes, применившая данный метод.

При использовании более высоких температур в стенках цилиндра, удастся снизить выбросы углеводорода, это позволит если не избавиться, то значительно снизить количество пристеночных углеводородов. Данный метод также является не только легко применимым на практике, но и простым в исполнении методом. Двигатели, используемые на легковых а/м завода АВТОВАЗ, соответствующие нормам ЕВРО используют охлаждающую жидкость температурой равной 363К (90° С). Апробация такого способа может проводиться на стендах путем повышения  $t$  охлаждающей жидкости.



1 – блок управления работой системы подачи дополнительного воздуха, 2 – блок системы зажигания автомобиля, 3 – блок управления клапанами подачи вторичного воздуха, 4, 7 – электропневмоклапан, 5, 8 –  $\lambda$ -зонд системы нейтрализации ОГ, 6 – воздушный компрессор.

Рисунок 3.2 Схема подачи вторичного воздуха.

Обратите внимание, что при использовании любого из перечисленных методов снижения, углеводорода и углекислого газа должна быть проведена качественная работа по изготовлению формы камеры сгорания, вопроса аэродинамики. Согласно данным [6, 13 и др.] имеющиеся вытеснители и их размерность в камере сгорания прямо пропорционально связаны с площадью зон гашения пламени и силой турбулентности.

Представленные методы снижения выбросов углекислого газа и углеводорода, которые можно считать традиционными, дополняются нововведениями, некоторые данные приведены в разделе 6.

### 3.2 Варианты снижения выбросов окислов азота

Уменьшение образования окислов азота ( $\text{NO}_x$ ) направлена на снижение высоких и средних температур рабочего цикла силового агрегата. Это основное направление потому, что образование окислов азота происходит при температуре более 1500K. Все способы, направленные на снижение температуры в камере сгорания силового агрегата приводят к снижению

образованию окислов азота. При этом надо учитывать, что при снижении температуры деталей двигателя, как известно, снижается теплоотдача и КПД двигателя. Исходя из этого, добиться снижения к минимуму выбросов окислов азота и максимуму экономичности не представляется возможным и в каждом конкретном случае необходимо принимать компромиссные варианты.

Низкая температура горения топливовоздушной смеси связана с работой силового агрегата на обогащенной или на очень обедненной. Оба этих варианта, полученных в условиях определённых ограничений, наиболее широко используются при калибровках силового агрегата. Возникшие в этом случае определенные проблемы, прежде всего связанные с обеспечением таких условий, как устойчивость к горению топливо воздушной смеси при бедных составах, решаются повышением турбулентности (завихрение) топливной смеси, повышением степени сжатия, использованием клапанов, обеспечивающих необходимую закрутку смеси и т.д.

Одним из достаточно распространенным способом является рециркуляция продуктов сгорания из выпускной системы перепуском обратно впускную в соотношении, порядка, 9 – 16 % по отношению к объёму подачи новой смеси. Поскольку остаточные отработанные газы оказывают такое же действие, что и рециркуляция газов, то можно применить и данный способ.

В своё время за рубежом были проведены исследования по добавлению воды в топливо (водоэмульсионные смеси). Водоэмульсионная смесь впрыскивалась непосредственно в впускную систему. Работы по калибровке двигателя для использования водоэмульсионной смеси также проводились и на ПАО «АВТОВАЗ».

В настоящее время уже применяются в автомобилях системы дросселирования. Данная система управляет не только дроссельной заслонкой, а и ещё впускными клапанами при помощи регулировки (изменением угла) распределительными валами, изменяемыми в зависимости от режимов работы силового агрегата. При уменьшении нагрузки уменьшается ход клапанов, а скорость подачи топливной смеси не снижается, как это обычно происходит без

датчика положения распределительного вала и тем самым увеличивается интенсивность завихрения топливной смеси в цилиндре силовой установки. Это достигается путем управления распределительными валами.

Поскольку требования к токсическим нормам (ЕВРО 2...5) на выбросы окислов азота постоянно ужесточаются, рассматриваются новые способы к снижению эмиссии окислов азота, некоторые данные приведены в разд.6.

## 4 Алгоритм проведения и анализ результатов проведенных испытаний

Проведенная и представленная исследовательская работа в основном направлена на изучение и сравнение полученных результатов, а также влияние добавления водорода в состав основного топлива на показатели, такие как «дымность» и экологичность при работе дизельного силового агрегата. Для успешной реализации поставленной цели потребовалось решить ряд выявленных проблем:

- спроектировать и изготовить систему для подачи водорода в состав дизельного топлива, для их смешивания в условиях лаборатории на моторном стенде;
- составить методику и план проведения лабораторных испытаний;
- сравнить полученные данные влияния водорода на дымности в работе двигателя. По полученным замерам определить оптимальный объем подаваемого водорода для контролируемого значения дымности и экологичности дизельного двигателя.

### 4.1 Предмет и условия испытаний

Исследовательские работы проводились на силовом агрегате, предназначенном для работы на сжиженном природном газе, снабженной электронной системой управления и искровым зажиганием, рабочим объемом равным 11,76л., степенью сжатия ( $\epsilon$ ) равной 12 и мощностью ( $N_e$ ) равной 260кВт.

Вовремя лабораторных испытаний данный двигатель поддерживался в технически исправном состоянии, удовлетворяющим ТУ, установленным заводом изготовителем.

К дополнению: моторноиспытательный стенд был снабжен системой принудительной подачи водорода для создания топливовоздушной смеси (ТВС). Схема представлена ниже на рисунке 4.1



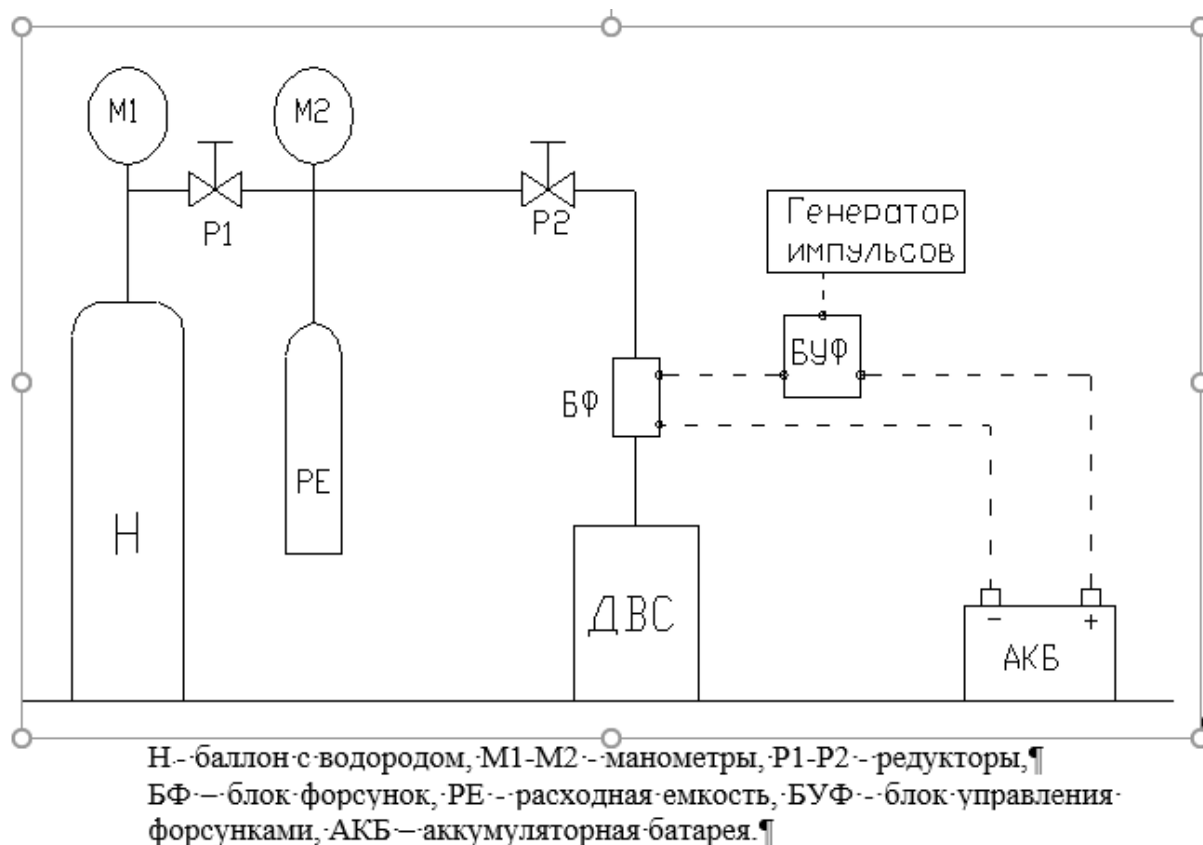


Рисунок 4.1- Схема системы подачи водорода

Вначале был произведен запуск двигателя при температуре  $22^{\circ}\text{C}$ , влажности и давлении, соответствующих окружающей среде. После ожидания прогрева двигателя до его рабочей температуры ( $T = 60^{\circ}\text{C}$ ). Затем на систему отвода выхлопных газов (выхлопная труба) установили диагностический прибор, для снятия исходных показаний при работе силовой установки на дизельном топливе, без добавления водорода, при этом замеры проводились в режиме свободного ускорения. Режим свободного ускорения – есть разгон двигателя от холостых оборотов до максимальных, путем быстрого однократного нажатия на педаль акселератора (подачи топлива) до упора. При получении максимальных оборотов вращения коленчатого вала двигателя и отпускали педаль. Следующим этапом работы была подача водорода в систему впуска топлива двигателя через тарированный жиклер путем открытия крана. Замеры показаний прибора производились аналогично измерениям на дымности без добавления водорода согласно требованиям, ГОСТ 21393-75.

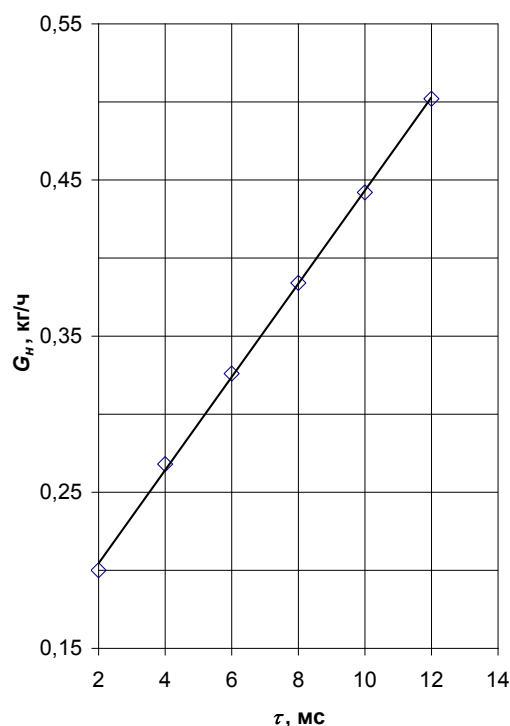


Рисунок 4.2 - Тарировочная зависимость БФ

Блок форсунок (БФ) состоит из четырех бензиновых электрофорсунок фирмы *Bosch*. Тарированной расхода водорода  $G_n$  приведена на графике рисунка 4.2.

Потребление водорода замеряется через систему расхода (длительность открытия) форсунок в составе блока форсунок, рабочая частота импульсов при этом составляла 50Гц. Управление частотой и продолжительность импульса сигнала производилось генератором прямоугольных импульсов «Г5 - 60».

Для управления диапазоном импульсов и возможности его уменьшения расходной характеристики, блока форсунок, использовалась функция отключения одной или сразу нескольких форсунок. В случае отключения форсунки, изменяется (тарифируется) и количество подачи водорода.

#### 4.2 Измерительное оборудование

«Все замеры при испытаниях силового агрегата производились согласно предусмотренного ГОСТ 14846-81. Дополнительно были произведены замеры следующих величин:

- расхода воздуха  $G_v$ , кг/ч;
- концентрации оксида углерода (CO), ppm;

- концентрации углеводородов (CH), ppm;
- концентрации окислов азота [29] «(NO<sub>x</sub>), ppm;
- расхода водорода, кг/ч;
- расхода отработавших газов ( $G_{O_2}$ ), кг/ч;
- угла открытия (положения) дроссельной заслонки  $\varphi$ , %;
- давления природного газа ( $P_2$ ), кгс/с<sup>2</sup>;
- давления картерных газов, кгс/с<sup>2</sup>.

Перечень оборудования и их характеристики, входящие в состав стенда приведены в таблице 4.1» [29]

Таблица 4.1 - Средства измерения.

Наименование средств измерений	Тип, фирма	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений	Срок проверки
1	2	3	4	5
Канал измерения крутящего момента: - тензодатчик	Фирма «Мотортест»	$\pm 1,5$	(0 ÷ 190) кг·с	В составе стенда 06.2017
Канал измерения числа оборотов: - датчик числа оборотов	Фирма «Мотортест»	$\pm 1,5$	(0 ÷ 4000) мин <sup>-1</sup>	В составе стенда 03.2017
Измеритель давления газа	Манометр МТП-160	$\pm 1,5 \%$	(0 ÷ 4,0) кгс/с <sup>2</sup>	III 2017 клеймо
Канал измерений температуры всасываемого воздуха: - преобразователь - термопара	Ш711/1И ХК	$\pm 2 \%$ $\pm 2 \%$	(0 ÷ 1000) °C (-200 ÷ 800) °C	В составе стенда 09.2017
Канал измерений температуры охлаждающей жидкости: - преобразователь - термометр сопротивления	Ш79 ТСП	$\pm 0,4 \%$ $\pm 0,1 \%$	(0 ÷ 150) °C (0 ÷ 120) °C	В составе стенда 09.2017
Канал измерений температуры масла: - преобразователь - термометр сопротивления	Ш711/1И ТСП	$\pm 2 \%$ $\pm 0,1 \%$	(0 ÷ 1000) °C (0 ÷ 120) °C	В составе стенда 07.2017
Канал измерений температуры топлива: - преобразователь - термометр сопротивления	Логометр Л-64 ТСМ	$\pm 1,5 \%$ $\pm 0,1 \%$	(0 ÷ 50) °C (-50 ÷ 150) °C	В составе стенда 09.2006
Канал измерений температуры ОГ (2 точки): - преобразователь - термопара	Ш711/1И ХА	$\pm 2 \%$ $\pm 2 \%$	(0 ÷ 1000) °C (-200 ÷ 1300) °C	В составе стенда 05.2017

#### Продолжение таблицы 4.1

Измеритель атмосферного давления воздуха	Барометр-анероид БАММ-1	1,0	(80 ÷ 106) кПа	П 2016 клеймо
Измеритель давление масла в двигателе	Манометр ЭКМ	± 1,5 %	(0 ÷ 1,0) МПа	В составе стенда 04.2017
Измеритель разряжения на впуске	Пьезометр водяной	± 2,0 мм.вод.ст	(0 ÷ 1500) мм.вод.ст.	В составе стенда 01.2017
Измеритель давление надувочного воздуха	Манометр образцовый (МО)	± 0,4 %	(0 ÷ 250) кПа	П 2017 клеймо
Измеритель давления во впускном коллекторе	Моновакуумметр	± 1,0 %	(-1,0 ÷ 3,0) кгс/с²	П 2017 клеймо
Измеритель давления картерных газов	Пьезометр водяной	± 2,0 мм.вод.ст	(0 ÷ 600) мм.вод.ст.	В составе стенда 02.2017
Измеритель влажности окружающего воздуха	Психометр аспирационный МВ-4М	0,2	(10 ÷ 100) % относ. влаж.	02.2017 клеймо
Состав отработавших газов	Газоанализатор фирма «Пирбург» (Германия). Зав №1144	± 1,0 %	(0 ÷ 10000) ppm	Св-во №2395 до 23.08.18

#### 4.3 План проведения лабораторных испытаний

Все работы выполнялись в соответствии с разработанной и утвержденной программой испытаний, включающей в себя подготовку стенда к испытаниям и снятию замеров с силового агрегата.

Замеры характеристик силового агрегата на рабочих режимах производились в заранее определенном порядке. Производился пуск двигателя, у которого изначально была температура равная температуре в моторном боксе. Влажности и давление в соответствии окружающей среды. Затем двигатель прогревался до рабочей температуры 85° С. Далее выбирались плановые исследуемые режимы работы силового агрегата и снимались фактические значения с измерительных приборов при работе силового агрегата на природном газе. После этого были проведены работы по добавлению водорода в основное топливо. Вовремя добавления водорода проводилась необходимая корректировка его количества, для каждого мощностного режима работы силового агрегат и по достижению оптимальных данных, проводилась фиксация показаний.

#### 4.4 Взаимосвязи, используемые при анализе результатов испытаний

Анализ основных параметров силового агрегата, таких как мощность, крутящий момент и т.д. производились по ГОСТ 14846-81.

Расчет параметров двигателя, которые не предусмотрены ГОСТ 14846-81, осуществлялись по методике ОАО КамАЗ.

#### 4.5 Погрешности показателей измерений

Незначительные погрешности при измерениях, предусмотренные по ГОСТ 14846-81, принимали как равные значения, принятым данным ГОСТом.

Полученные результаты погрешности измерений показателей силового агрегата и насколько точно были выполнены необходимые замеры, непредусмотренные ГОСТ 14846-81, особенно касаясь расхода воздуха и водорода. Далее выявились погрешности в вычислениях коэффициента переизбытка воздуха, как одного из основополагающих факторов, определяющих эффективность работы силового агрегата, проводились в следующей последовательности.

Абсолютную погрешность можно записать как:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta_{сл},$$

где  $\Delta_c$  – не исключена систематическая погрешность;

$\Delta_{сл}$  – случайная составляющая погрешности измерений.

Систематическая погрешность определяется по формуле:

$$\Delta_c = k \sqrt{\sum_{i=1}^m Q_i^2},$$

где  $Q_i$  – граница  $i$ -ой не исключённой систематической погрешности;

$k$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью  $\beta$ , и равный 1,1 при  $\beta = 0,95$

Случайная составляющая погрешности, определена по формуле:

$$\Delta_{сл} = \frac{S \cdot t}{\sqrt{n}},$$

где  $t$  – коэффициент (квантиль) Стьюдента, зависящий от количества проведенных опытов и принятой доверительной вероятности;

$S$  – среднее квадратическое отклонение;

$n$  – число результатов наблюдений (повторных опытов).

Величину  $S$  определили по формуле» [29]:

$$S = \frac{\overline{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}}{n-1},$$

где  $X_i$  –  $i$ -ый результат измерений,

$X$  – среднее значение, определяемое как

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Результат погрешностей получили в зависимости от отношения:

$$\varphi = \frac{\Delta_c \cdot \bar{n}}{S}$$

В том случае, если величина  $\phi$  находится в диапазоне  $0,8 < \phi < 8$ , то суммарная погрешность находится в построении композиции распределений случайных и систематических погрешностей:

$$\Delta = S \cdot K,$$

где  $K$  – коэффициент систематической погрешностей;

$S$  – оценка суммарного среднего квадратического отклонения результата измерения.

Величины  $K$  и  $S$  определяются по формулам» [29]:

$$K = \frac{\Delta_c + \Delta_{cl}}{\frac{S}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i2}}{3}}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m Q_{12}}{3} + \frac{S^2}{n}}$$

Относительная погрешность, полученная в результате вычислений, определяется, как отношение абсолютной погрешности к измеренному значению.

После расчетов, выполненных по представленной выше методике можно сделать вывод, что относительная погрешность замеров для расхода водорода составила  $\delta_{G_H} = \pm 5\%$ .

Для вычисления погрешности замеров расхода воздуха, проходящего через системы силового агрегата, методом насадок  $\delta_b = \pm 2\%$ , в соответствии с полученными рекомендациями.

Для получения максимально точных данных, замеры проводились с учетом оценки погрешности измерений в соответствии с ГОСТ – 8.207-76.

4.6. Результат измерения и оценка его среднего квадратического отклонения:

- среднее арифметическое результатов замеров вычисляется по формуле:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

- систематическая погрешность (погрешность измерительного прибора) определяется по формуле:

$$\Delta_{\text{сис}} = \frac{\bar{y} - y_{\text{пл}}}{\bar{y}} \cdot 100 \%$$

где  $\bar{y}$  - среднее арифметическое результатов замеров

$y_{\text{пл}}$  – тарированная пластина со светопропускаемостью 1.27 [1/м]

Погрешности измерительного прибора для каждой серии испытаний отражены в приложении А.

- среднее квадратическое отклонение результата измерения определяется по формуле:

$$S(y_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

где n – количество измерений серий опытов

- аномальные значения оцениваются в зависимости от коэффициента  $\tau_i$ , этот коэффициент определяется по формуле:

$$\tau_i = \frac{y'_i - \bar{y}}{S(y_i)}$$

где  $y'_i$  - аномальное измеренное значение

Коэффициент  $t_i$  сравнивается с табличным значением  $t$  для определенного числа сделанных измерений.

Результаты определения  $t_i$ , среднего значения квадратического отклонения и аномальных значений, представлены в приложении Б.

Погрешность измерительного прибора для каждой серии испытаний отражены в приложении А.

Допустимые границы (без учета знака) случайной погрешности результатов измерения находят по формуле:

$$\Delta = t \cdot \frac{S(x)}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

где  $t$  - критерий Стьюдента.

Значения  $\Delta$  для испытаний занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения доверительных (допустимых) границ случайной погрешности результатов измерений.

Дата	$\Delta$		
	До подачи	При подаче	После отключения подачи
04.09.2017	0,478	0,159	0,225
07.09.2017	0,534	0,368	0,192

Запишем достоверный массив, который равен массиву полученных данных, за вычетом аномальных значений и систематической погрешности. Значения достоверного массива заносим в приложении В.

$$K_1 = 3,002 \pm 0,478; \beta = 0,95$$

$$K_2 = 2,353 \pm 0,159; \beta = 0,95$$

$$K_3 = 2,944 \pm 0,225; \beta = 0,95$$

$$K_4 = 3,271 \pm 0,534; \beta = 0,95$$

$$K_5 = 2,863 \pm 0,368; \beta = 0,95$$



$$K_6 = 2,166 \pm 0,192; \beta = 0,95$$

где  $K_1, K_2, K_3$  – результаты измерений (до подачи водорода, при подаче водорода и после отключения подачи водорода соответственно).

$K_4, K_5, K_6$  – результаты измерений (до подачи водорода, при подаче водорода и после отключения подачи водорода соответственно).

Чтобы увидеть наглядную картину необходимо построить графики (рис. 2-5) зависимости получившихся в ходе испытаний значений достоверного массива по времени.

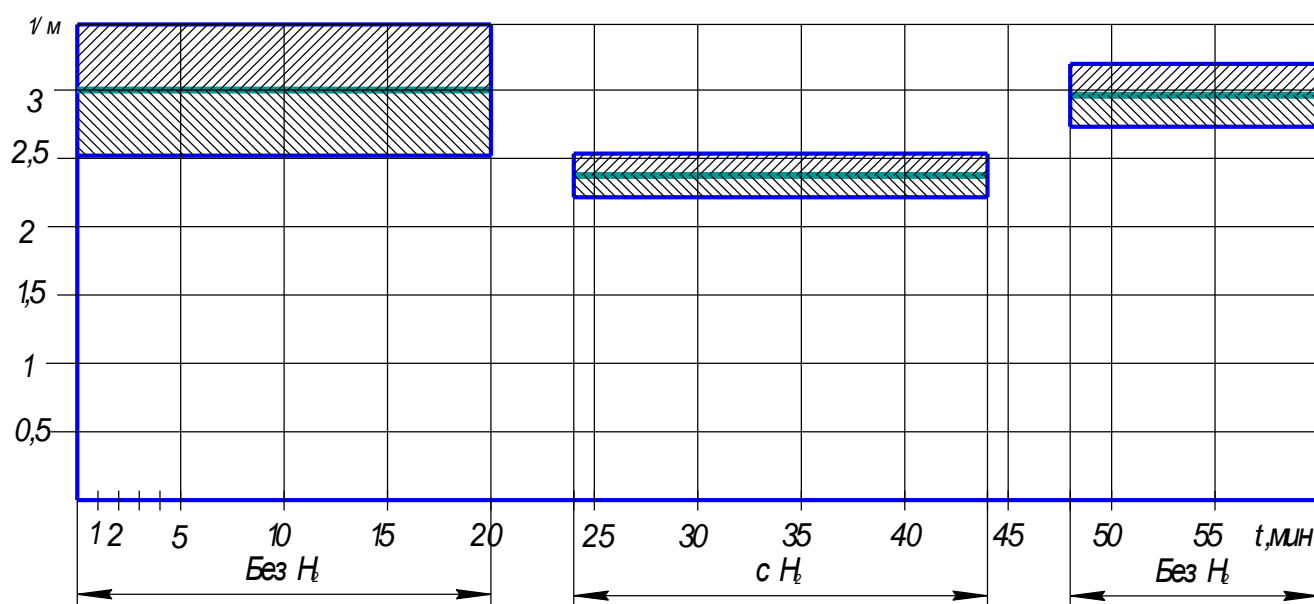


Рисунок 2 – Графики показаний дымности (жиклер №1)

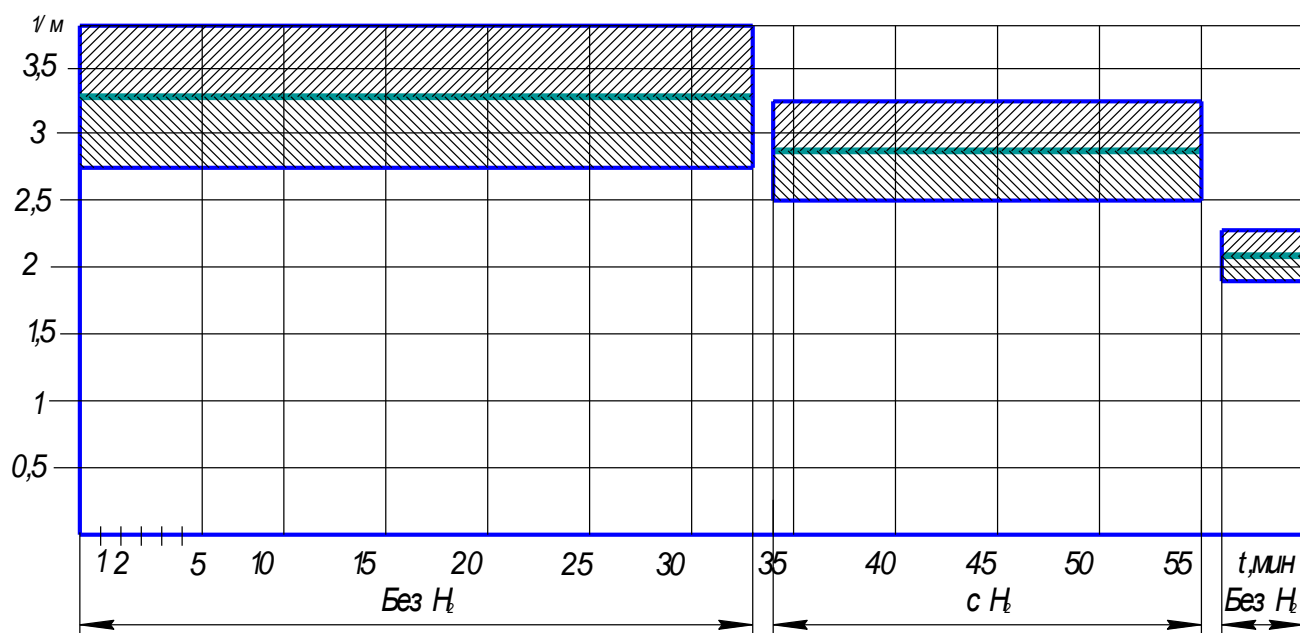


Рисунок 3 – График показаний дымности (жиклер №2)

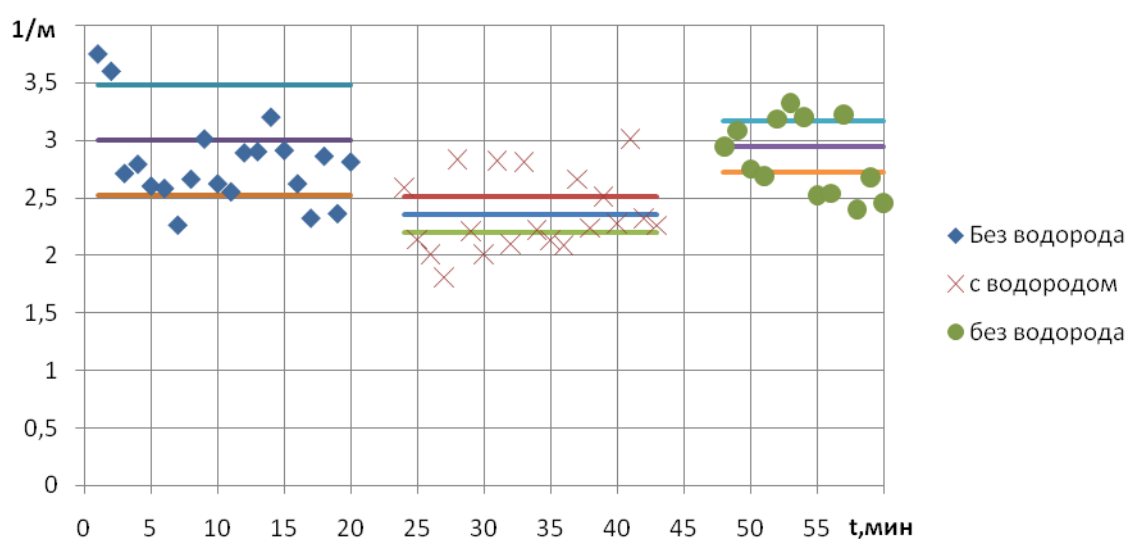


Рисунок 4 График зависимости показаний дымности ОГ от времени (жиклер №1)

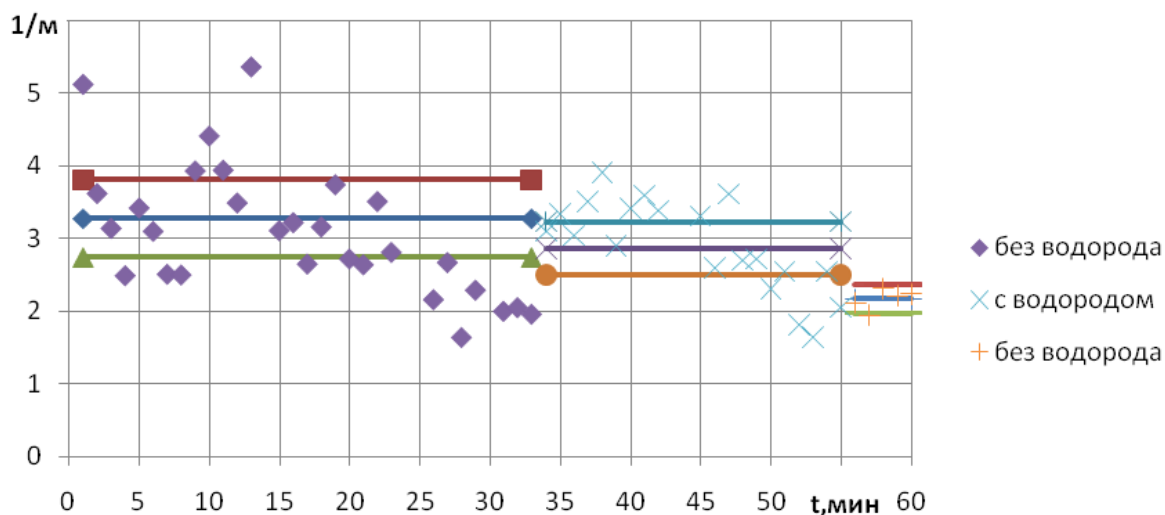


Рисунок 5 – График зависимости показаний дымности ОГ от времени (жиклер №2)

На основании полученных результатов в ходе проделанной работы (рис. 3-5) становится понятно, что при отсутствии водорода в период времени равному 1 часу в количество сажи значительно снизилось, не подтверждает наши предположения о снижении дымности при подаче водорода в двигатель. Данное явление связано с тем, что количество измерений на данном интервале не дает возможности получить максимально точный результат, необходимо производить гораздо больше изменений в данный отрезок времени. В периоды времени, когда измерения производились чаще можно проследить понижение дымности.

- (жиклер №1) количество сажи снизилось до 20 %.
- (жиклер №2) количество сажи снизилось до 12,5 %.

## 5 Результаты лабораторных исследований и их анализ

Первоочередные результаты испытаний приведены в таблицах 1-3 (приложения А). «Величина добавления водорода определялась исходя из фактически полученных результатов по экономичности и токсичности двигателя. Его возможность и эффективность была получена благодаря бортовому генератору водорода с заданной производительностью. По ранее изученным экспериментальным данным» [4], [5] относительный расход водорода примерно должен составлять в пределах 3 – 6 % от расхода углеводородного топливной смеси, что соответствует режимам малых нагрузок силового агрегата автомобиля КамАЗ на величину в пределах  $H = 0,2 - 0,5$  кг/ч.

### 5.1 Регулирование состава смеси

Регулировочные параметры по составу смеси фиксировались при работе силового агрегата на холостом ходу (ХХ) и на режиме с частотой вращения коленчатого вала  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> и нагрузки  $P_e = 1,46$  кг/см<sup>2</sup>, при УОЗ = 0° и 15° по углу поворота коленчатого вала.

На графике рисунке 5.1 представлен расход природного газа  $G_r$ , воздуха  $G_v$  и отработавших газов  $G_{ог}$  от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , при работе силового агрегата на ХХ. Можно наблюдать, что при увеличении количества подаваемого водорода происходит значительное снижение расхода воздуха, природного газа и в целом объем отработанных газов. Заметим, что в данной серии лабораторных испытаний не планировалось получить характеристики, которые полностью совпадают с диапазоном  $\alpha$ , что требует больших временных и финансовых затрат на стендовые испытания и не представляется необходимым в связи с нецелесообразностью на основе известных уже ранее полученных данных. Значения, представленные в графиках достаточно точные. «Прослеживается закономерность, выявленная из ранее проделанных опытов, является увеличение времени стабильного горения при добавлении водорода, поэтому уменьшение потребления природного газа будет наблюдаться вплоть до предела эффективного смешивания, соответствующего конкретным

значениям соотношения природного газа и водорода, величина которого должна определяться специальными опытами» [33], [36].

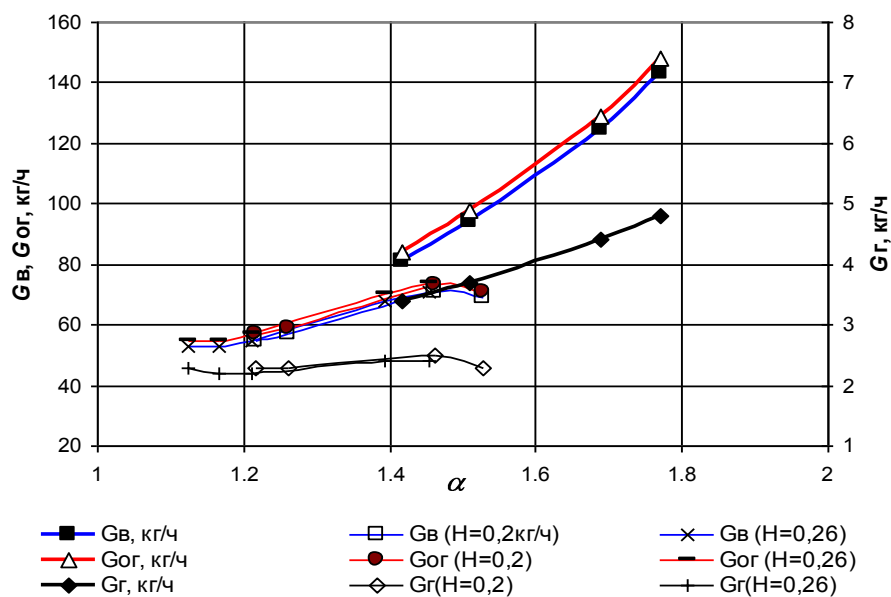


Рисунок 5.1 - Характеристика по составу смеси

( $n = 800$  об/мин,  $Pe = 0$ ,  $УОЗ = 0$ )

Результаты, представленные на рисунке 5.1 позволяют оценить снижение общего количества массового выхода отработанного газа. В частности, при  $\alpha = 1,3$  и  $\alpha = 1,4$  выбросы отработанных газов уменьшаются с 75 до 65 и 82 до 70 кг/ч, соответственно, что составляет около 13 % и 14 % по общей массе.

На рисунке 5.2 представлены графики положения (открытие) дроссельной заслонки при впрыске водорода. Можно отметить, что при наличии в топливоздушном смеси водорода процент открытия дросселя меньше, что может вызвать нерегулируемое изменение частоты вращения коленчатого вала (неустойчивая работа двигателя), определяющиеся порогом чувствительности регулятора ХХ.

По данным графика на рисунке 5.3 температура отработанных газов перед турбинами низкая. Добавляя порцию водорода температура отработанных газов начинает снижаться с  $430^{\circ}\text{C}$  до  $340^{\circ}\text{C}$ , это связано с процессом теплообмена, т.е при полном сгорании природного газа снижается объем и масса отработанных газов.

На графике рисунка 5.4, приведена регулировочная характеристика при оборотах коленчатого вала  $n = 1550$  об/мин и угла опережения зажигания  $15^\circ$ .

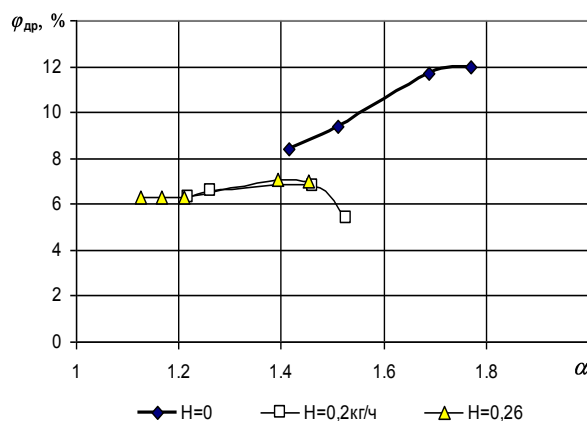


Рисунок 5.2- Изменение положения дроссельной заслонки ( $n = 800$  об/мин, перед турбиной в левом и правом рядах  $Pe = 0$ )

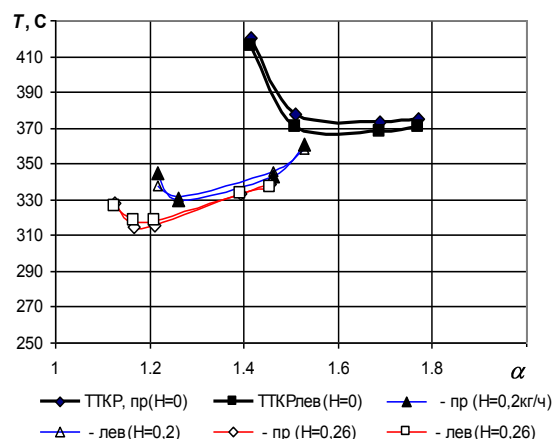


Рисунок 5.3 – Изменение температуры двигателя ( $n = 800$  об/мин<sup>1</sup>,  $Pe = 0$ )

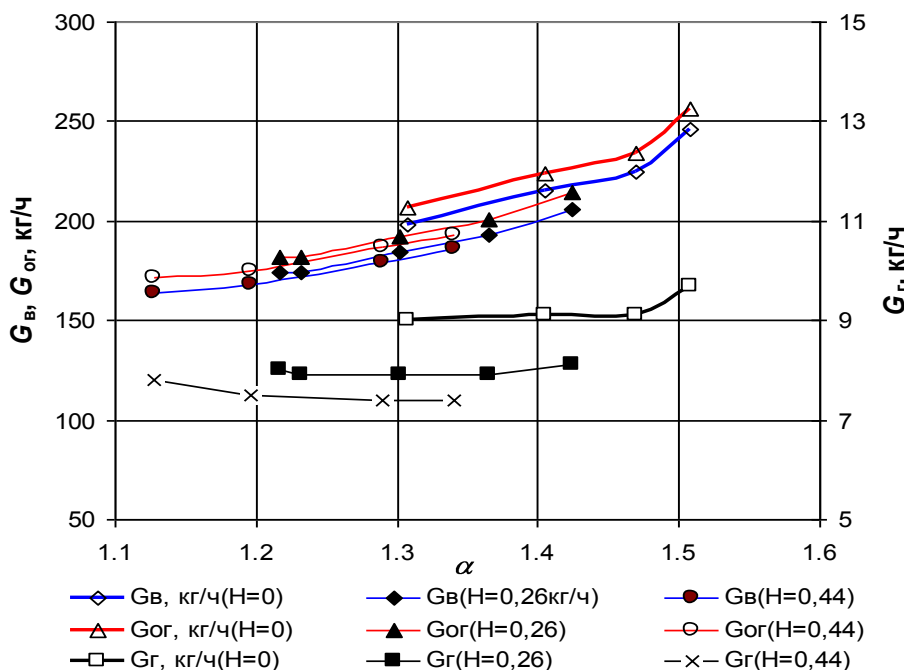


Рисунок 5.4 – Регулировочная характеристика по составу смеси ( $n = 1550$  мин<sup>-1</sup>,  $Pe = 1,46$  кг/см<sup>2</sup>,  $\gamma O_3 = 15^\circ$ )

Анализируя данные графиков при добавлении водорода в количестве  $H=0,26$  кг/ч ;  $H=0,44$  кг/ч, при условии работы двигателя на данных режимах также приведет к снижению расхода природного газа, воздуха, а следовательно

отработанных газов в целом. При понижении относительной доли водорода в топливе (по сравнению с работой на холостом ходу) снижается расход природного газа, он будет равен: при  $\alpha = 1,4$  и добавлении водорода  $H = 0,26$  кг/ч (3% от расхода природного газа (ПГ)) - 11%, при добавлении  $H = 0,44$  кг/ч (5% от ПГ) – 16%. Важно отметить, что изменение количества водорода (до 3%) приведет к изменению параметров самого двигателя. При снижении расхода природного газа и увеличении количества подаваемого водорода (5–8%). Самый эффективный результат был получен при увеличении водорода на 3-6%. Данный результат зависит от прохождения активной химической реакции во время процесса горения топлива. Если подача водорода еще возрастет, то эффект снизится, а действие водорода сведется к простому замещению основного топлива.

Снижение расхода воздуха и отработанных газов в целом, определяется усилением процесса горения и составляет для массового выброса отработанных газов, например: при  $\alpha = 1,4$  и водорода  $H = 0,26$  кг/ч - 4,5%, а при водороде  $H = 0,44$  кг/ч – 9%. Снижение расхода воздуха соответствует приоткрытой дроссельной заслонки с работой на природном газе (см. рисунок 5.5).

На рисунке 5.6 представлены графики изменения значений температуры перед турбиной при работе силового агрегата на природном газе и с добавлением водорода. Можно также заметить достаточно большую разницу между температурой правого и левого рядов цилиндров силового агрегата. Так же есть и другая зависимость, изменение температуры по  $\alpha$ . так, по сравнению с работой на холостом ходе, отсутствует активно выраженная тенденция снижения температуры при увеличении  $\alpha > 1,4$ .

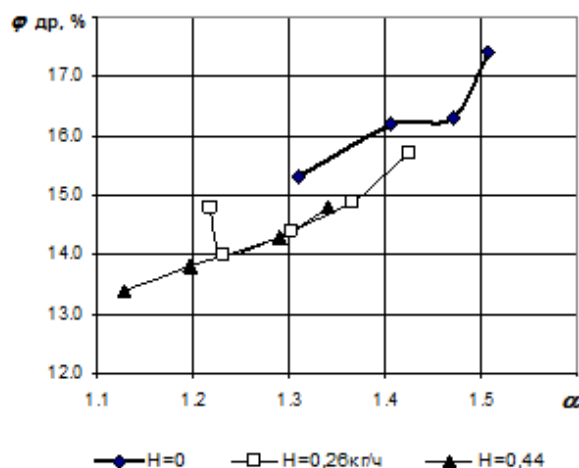


Рисунок 5.5 – Положение дроссельной заслонки и добавление водорода ( $n=1500$  об/мин,  $P_e=1,46$  кг/см<sup>2</sup>, УОЗ = 15°).

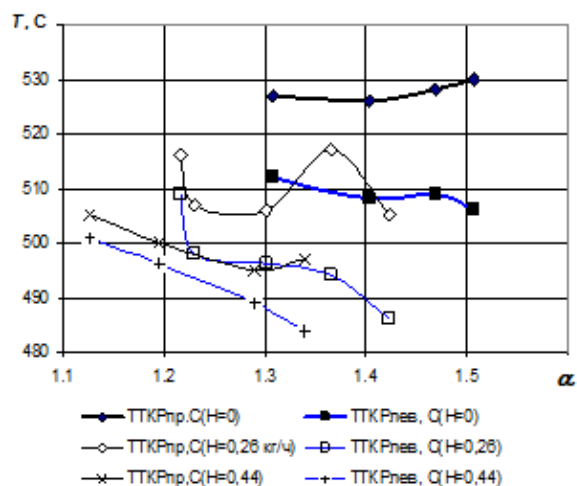


Рисунок 5.6 - Изменение температуры газа перед турбиной при добавлении водорода ( $n=1500$  об/мин,  $P_e=1,46$  кг/см<sup>2</sup>, УОЗ = 15°).

По показателям рисунка 5.6 можно наблюдать, что отличия температуры турбокомпрессора в правом и левом рядах цилиндров значительно больше по сравнению с работой на холостом ходе и уменьшается при добавлении водорода.

Добавление водорода способствует уменьшению температуры перед турбинами в обоих рядах силового агрегата. Объем этого снижения, например, составляет, примерно, 17 - 20° С при  $\alpha = 1,3$ , для обоих рядов цилиндров силового агрегата.

Сравнительную оценку эффективности добавления водорода во время рабочих режимах силового агрегата можно получить, используя значения КПД, определяемого по формуле:

$$\eta_e = \frac{3,6 \cdot N_e}{Q_T},$$

где  $Q_T$  – количество теплоты подведённой с топливом, определяемое как

$Q_T = G_T \cdot H_u$ , при этом  $G_T$  – расход топлива,  $H_u$  – низшая теплотворная способность топлива.

При добавлении водорода, количество теплоты, подведённой с топливом определяется как:



$$Q_T = G_2 H_{u2} + G_H H_{uH},$$

где  $H_{u2}$  и  $H_{uH}$  – минимальные тепловые способности природного газа и водорода, соответственно, принятые равными  $H_{u2} = 41,7$  и  $H_{uH} = 120$  мДж/кг.

Изменения эффективного КПД представлены на графике рисунка 5.7. При работе на природном газе и установленных настройках силового агрегата, эффективный КПД не превышает значения порядка,  $\eta_e = 18$  %, а с увеличением  $\alpha$  снижается, что свидетельствует о неэффективности регулировок при  $\alpha$  более  $\alpha = 1,3$  (по экономичности силового агрегата). Увеличивая порцию водорода  $\eta_e$  растет, а именно до 18,7 %, соответственно при  $H = 0,26$  кг/ч на 20%, т.е. примерно, на 3,5 и 10%.

Можно сделать следующий вывод: использование водорода в качестве добавки к основному топливу в пределах от 0,26 до 0,44 кг/ч, а это 3 – 5 % к основному объему, дает возможность повысить экономичность силового агрегата, оцениваемую эффективными показателями КПД на данном режиме работы.

Заметим, что показатели экономичности силового агрегата на удельный расход, не оправданно т.к. может использоваться только как сравнительная оценка между силовыми агрегатами работающие на топливе постоянного состава, например, бензине, природном газе и сжиженном газе. Добавление водорода меняют свойства топлива и соответствуют режимам работы силового агрегата на топливах разного химического состава и теплофизических свойств, что предусмотрено формулой эффективного КПД, который является универсальной оценкой экономичности силового агрегата при работе на разном топливе.

## 5.2 Управление нагрузкой

На рисунках 5.8 – 5.17 представлены характеристики, снятые при частоте вращения коленчатого вала, равной  $n = 1500$  и  $2200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\text{УОЗ} = 10^\circ, 15^\circ$  и  $18^\circ$  и положению коленчатого вала и при добавлении водорода  $H = 0,26 \text{ кг/ч}$  и  $0,44 \text{ кг/ч}$ . На всех показанных рисунках угол опережения зажигания равен  $15^\circ$  положению коленчатого вала т.к. это значение является принятым в настройках при работе на природном газе. Можно наблюдать, что добавление водорода оказывает большое влияние на показатели силового агрегата в указанном объеме на режимах до  $P_e = 3 \text{ кг/см}^2$ .

Так на графиках рисунка 5.8 (см. также таблицу А1) можно видеть, что при  $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$  расход газа уменьшается с  $11,4$  до  $7,9 \text{ кг/ч}$ , это составляет 30% от расхода природного газа. При нагрузке более  $P_e = 3 \text{ кг/см}^2$  действие добавления водорода снижается и уменьшается расхода ПГ остается примерно одинаковым в пределах 5 %. Меняя угол опережения зажигания в меньшую сторону приводит к возрастанию  $G_B$  и  $G_T$ .

Идентичная зависимость получена и при замерах характеристик при частоте вращения коленчатого вала  $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$  (рисунок 5.9). Можно также наблюдать, что большое влияние водород оказывает при незначительных нагрузках и уменьшение, например, расхода ПР газа составляет от 10 % до 2 % при максимальной нагрузке. В аналогичных пределах изменяется и расход воздуха.

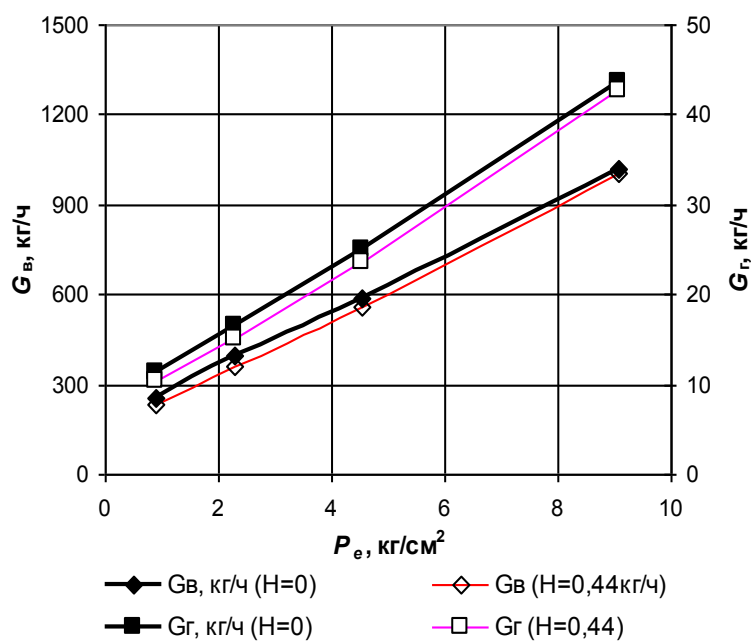


Рисунок 5.9 – Нагрузочная характеристика ( $n = 2200$  мин-1,  $\text{УОЗ} = 18^\circ$ )

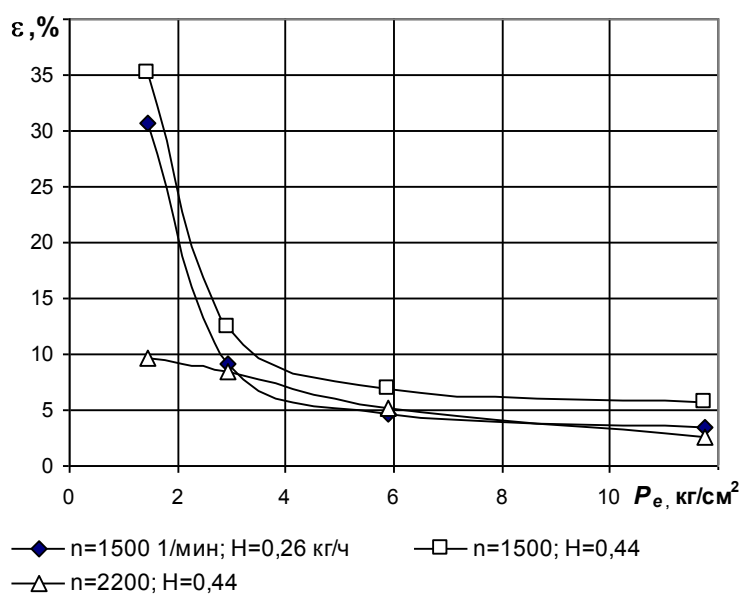


Рисунок 5.10 – Снижение расхода ПГ при добавлении водорода.

На графике рисунка 5.10 «представлены показатели снижения в процентах, расхода ПГ при добавлении водорода на нагрузочных режимах работы солового агрегата, т.е. при частоте вращения коленчатого вала в пределах 1500 - 2200 об/мин. Можно выделить закономерность и величину

снижения расхода газа при использовании водорода. Значимый эффект добавления водорода отмечается при минимальных нагрузках, с увеличением нагрузки этот эффект снижается из-за снижения относительного количества Н в рабочей смеси» [29].

Как правило, изменение расхода ПГ и воздуха меняет количество отработанного газа, графики которого показаны на рисунках 5.11 – 5.12. По графикам можно наблюдать, что количество отработанного газа снижается. Анализ изменения  $\alpha$ , с данными рисунка 5.7 позволяет отметить, что принятые настройки на скоростном режиме и при низких нагрузках не являются оптимальными, т.к. эффективный КПД значительно уменьшается. Добавки водорода в выбранном объеме, позволяют увеличить экономичность, что и приводит к увеличению КПД при более бедных  $\alpha$ .

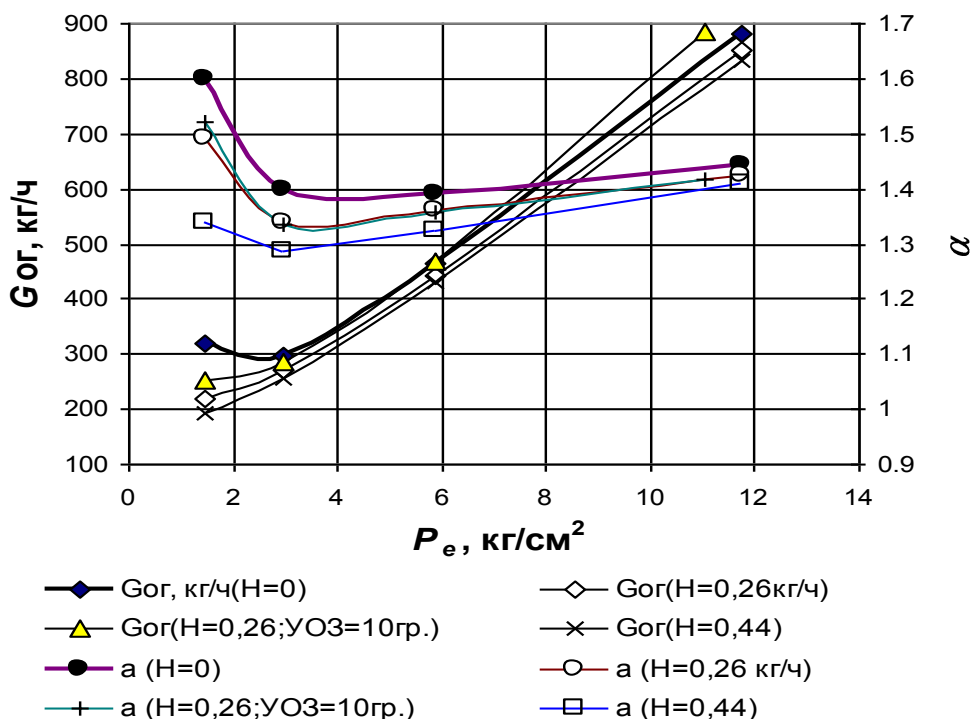


Рисунок 5.11 Нагрузочная характеристика  
( $n = 1500$  об/мин,  $УОЗ = var$ )

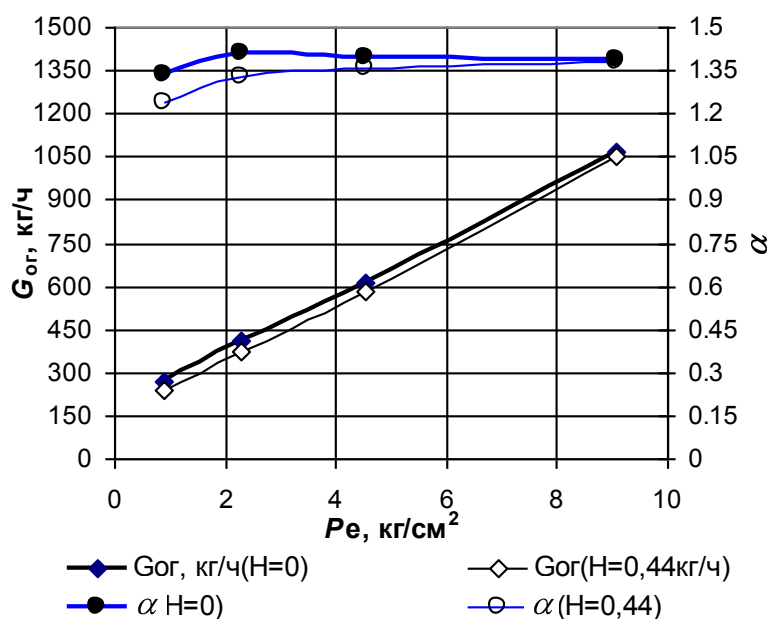


Рисунок 5.12 - Нагрузочная характеристика  
( $n = 2200$  об/мин,  $\gamma_{O_2} = 18^\circ$ ).

На графике рисунка 5.12 приведены данные количества отработавших газов и коэффициента избытка воздуха от нагрузки при частоте вращения коленчатого вала  $n = 2200$  об/мин. Можно видеть похожие значения на графиках рисунка 5.11, зависимости (снижения  $\alpha$  и  $G_{ог}$  при добавлении водорода) несколько уменьшенных «количественных характеристик, что объясняется меньшим относительным количеством добавок водорода и уменьшением эффективности его действия с изменением значений рабочего процесса (снижением относительного объема естественно рециркулируемых отработанных газов и увеличением турбулентности топливной смеси» [14, 37]. Следует заметить существенно более малый уровень значений  $\alpha$  по сравнению с режимом  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> (см. рисунок 5.11) в области малых нагрузок. Это дает возможность увеличения влияния водорода на данном скоростном режиме в случае назначения в настройках больших величин  $\alpha$ .

На графиках рисунках 5.13 и 5.14 приведены данные замеров температуры перед турбиной в правом и левом рядах силового агрегата. Так же можно отметить, что добавление водорода вызывает увеличение влияния в области малых нагрузок. Так, например, при оборотах коленчатого вала двигателя  $n = 1500$  об/мин и давлении  $P_e = 1,46$  кг/см<sup>2</sup>, добавка водорода в

объеме  $H = 0,26$  кг/ч приводит к падению температуры газа непосредственно «перед турбиной на  $60^\circ\text{C}$  и с добавлением объема водорода до  $H = 0,44$  кг/ч, этот принцип снижения температуры сохраняется. При больших показателях нагрузок так же отмечается снижение температуры перед турбиной, однако его величина, как и при  $n = 2200$  об/мин не значительна.

Значительное увеличение в области средних и больших нагрузок замеряемой температуры при уменьшении угла опережения зажигания до значения  $\theta = 10^\circ$  положения коленчатого вала, что говорит о низкой скорости горения топливовоздушной смеси, определяемой установленным значением  $\alpha$ , которое в области повышенных нагрузок не компенсируется добавлением водорода» [29].

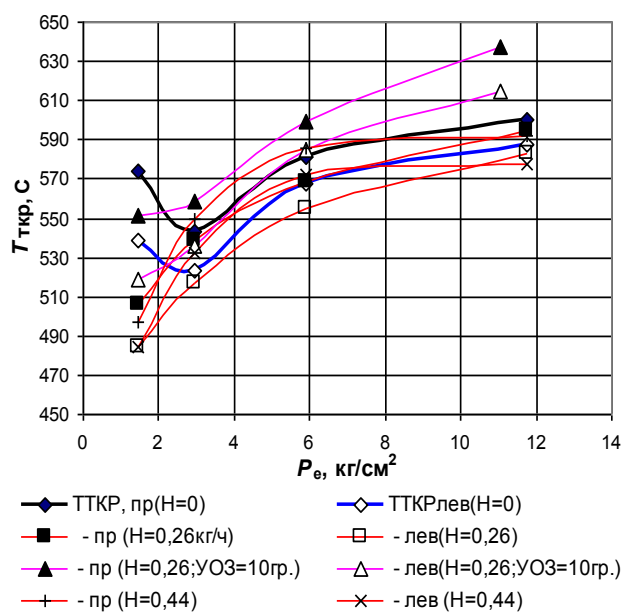


Рисунок 5.13 Изменение температуры перед турбиной ( $n = 1500$  об/мин, УОЗ = var)

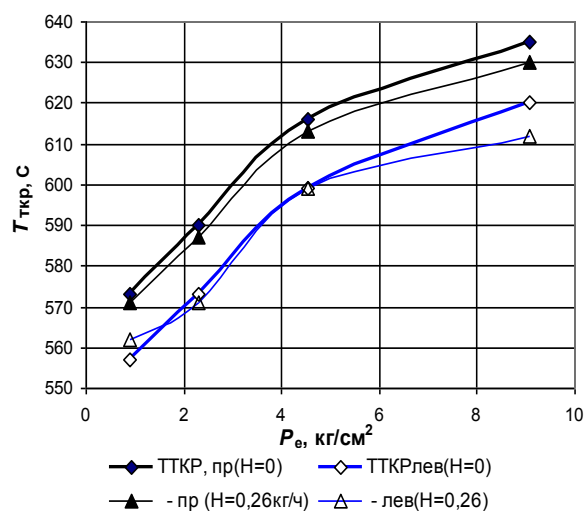


Рисунок 5.14 Изменение температуры перед турбиной ( $n = 2200$  об/мин, УОЗ =  $18^\circ$ )

При минимальных нагрузках и добавлении водорода увеличивается скорость сгорания рабочей топливной смеси при УОЗ  $10^\circ$ , температура газа перед турбинами ниже, чем при работе на природном газе и УОЗ  $15^\circ$ .

На рисунках 5.15 и 5.16 представлены графики изменения эффективного коэффициента полезного действия по нагрузочным характеристикам при оборотах  $n = 1500$  об/мин и  $n = 2200$  об/мин.

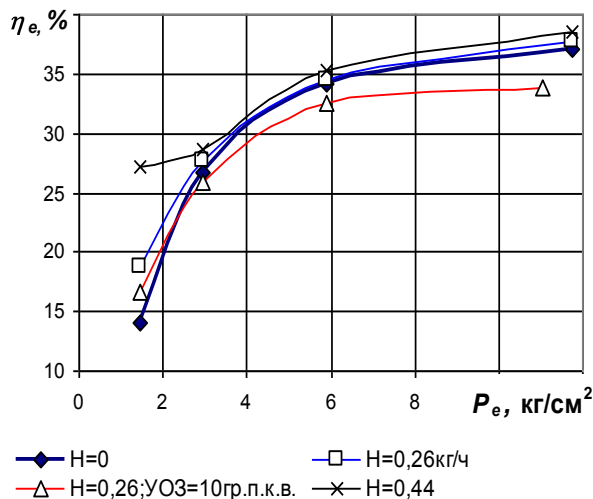


Рисунок 5.15 Изменение эффективного КПД ( $n = 1500$  об/мин,  $\text{УОЗ} = 10^\circ$  и  $15^\circ$ ).

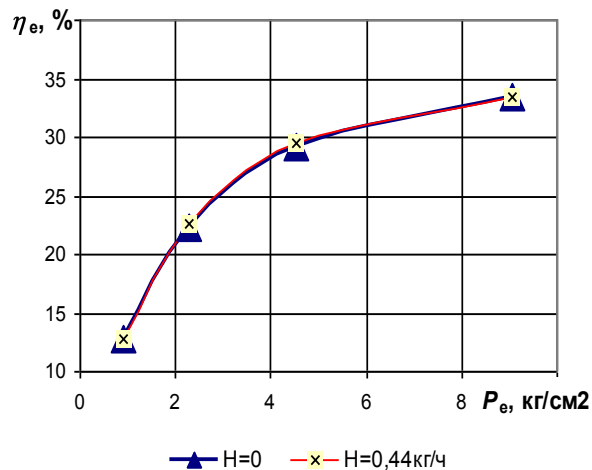


Рисунок 5.16 Изменение эффективного КПД ( $n = 2200$  об/мин<sup>1</sup>,  $\text{УОЗ} = 18^\circ$ ).

На графиках видно, что основное воздействие добавления водорода оказывается при работе силового агрегата с низкими нагрузками и небольшой частоты вращения коленчатого вала силового агрегата, в частности, при  $n = 1500$  об/мин и  $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$  (мощность порядка 25 кВт) добавка водорода в количестве  $H = 0,26 \text{ кг/ч}$  увеличивает эффективный КПД на 5%, а  $H = 0,44 \text{ кг/ч}$  – на 13%.

При оборотах  $n = 2200$  об/мин воздействие добавок водорода на эффективный коэффициент полезного действия в количестве  $H = 0,44 \text{ кг/ч}$  практически не сказывается (рисунок 5.16). Этот эксперимент свидетельствует о том, что данный режим работы силового агрегата является приближённым к оптимальному и добавление водорода не приводит к его улучшению, т.е. водород не влияет на процесс горения, а проявляется в качестве дополняющего основное топливо, как горючего компонента. Однако низкое значение эффективного КПД по сравнению с режимом на оборотах  $n = 1500$  об/мин, объясняется существенным увеличением механических потерь на данном

скоростном режиме, а именно на газообмене при открытии дроссельной заслонки (см. рисунок 5.17).

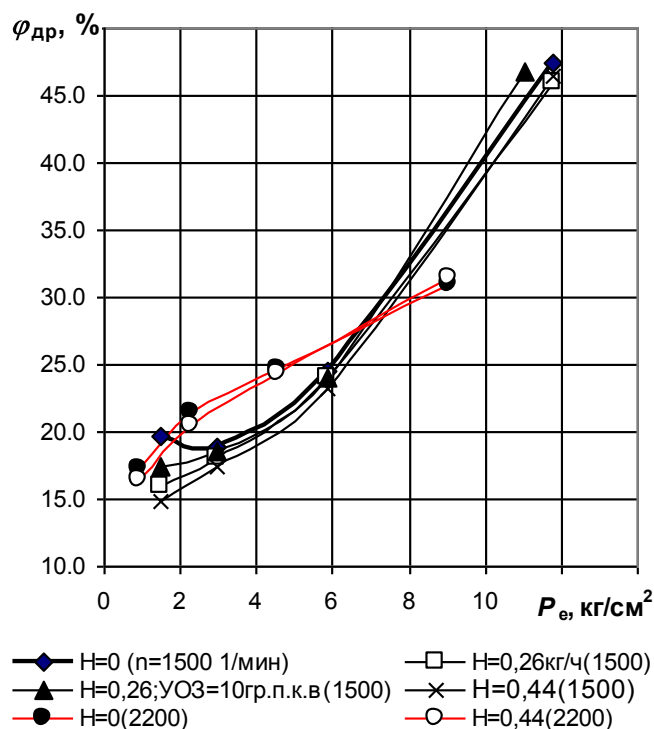


Рисунок 5.17 – Изменение положения дроссельной заслонки.

### 5.3 Управление режимами с помощью УОЗ

При выполнении экспериментальных лабораторных исследований с целью определения значимости влияния угла опережения зажигания (УОЗ) при добавлении водорода, были приведены оценочные работы с разными углами зажигания  $\theta$ , а именно на скоростном режиме при оборотах коленчатого вала силового агрегата  $n = 1500$  об/мин, равными  $10 - 15^\circ$  положения коленчатого вала, проведена на графиках рисунков 5.18-5.20.

На рисунке 5.18 представлена зависимость изменения расхода природного газа и соответствующих им  $\alpha$ . Можно заметить, что использование водорода позволяет достаточно точно настроить и добиться оптимальных значений угла опережения зажигания, которое смещается в сторону наименьших значений. Так, например, при объеме расхода ПГ и УОЗ =  $15^\circ$ , без использования водорода, примерно равна уровню расхода ПГ с добавлением водорода и УОЗ =  $10^\circ$ . По проведенным испытаниям можно сделать вывод о



том, при добавлении водорода можно увеличить УОЗ, что приведет к улучшению показателей по экономичности силового агрегата.

Графики рисунка 5.18 показал, что водород поддерживает теорию о расширении области зависимости показателей силового агрегата от угла опережения зажигания.

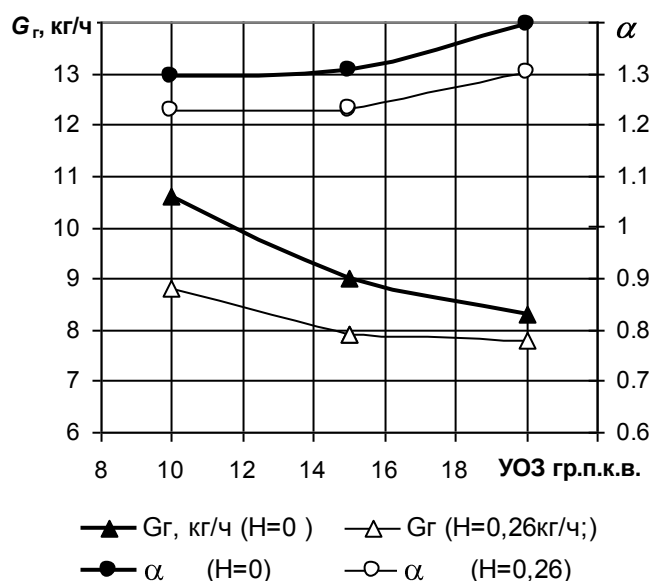


Рисунок 5.18 – Регулировочная характеристика по УОЗ ( $n = 1500$  об/мин,  $P_e = 1,46$  кг/см<sup>2</sup>).

Результаты проведенных замеров расхода воздуха и положение дроссельной заслонки в процентах, температуры газов перед турбинами в правом и левом рядах цилиндров двигателя представлены на рисунках 5.19 и 5.20. Внимательно изучив получившиеся замеры можно утверждать, что при подаче водорода на любых углах опережения зажигания все параметры двигателя при постоянной мощности увеличиваются. Расход воздуха понизится на 16%, при УОЗ = 10°, при УОЗ = 15° на 12%. Такая зависимость приведет к уменьшению общего массового объема отработанных газов (см. таблицу А2), что являясь дозируемым, нормированным токсическим выбросом.

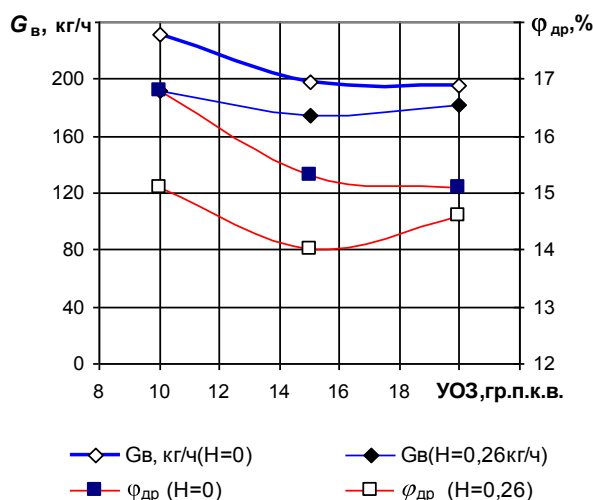


Рисунок 5.19 – Регулировочная характеристика по УОЗ ( $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e=1,46 \text{ кг/см}^2$ ).

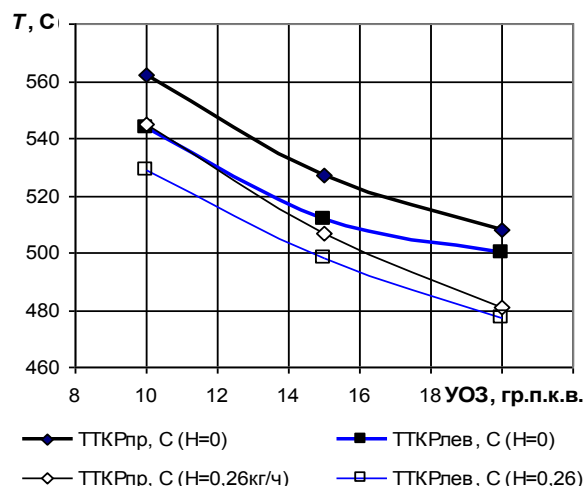
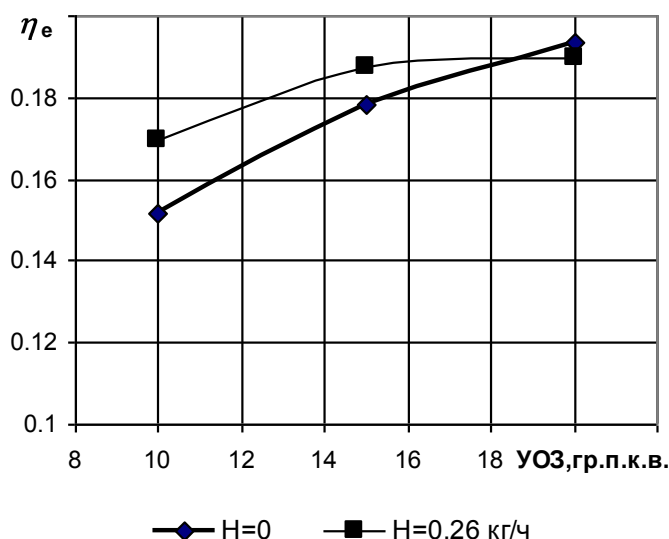


Рисунок 5.20 – Изменение температуры перед турбиной ( $n=1500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e=1,46 \text{ кг/см}^2$ ).



На рисунке 5.21 показаны графики с показателями эффективного коэффициента полезного действия по углу опережения зажигания. Хотелось отметить, что добавление водорода наиболее эффективно отображается при малых углах опережения зажигания, что объясняется, как приведено выше, распространением скорости горения ТВС. Использование водорода в силовом агрегате позволяет уменьшить угол опережения зажигания при сохранении эффективной работы силового агрегата и снизить выбросы токсических веществ в отработанных газах, таких как углекислый газ и углеводород. Также можно отметить, что при добавлении водорода в топливо можно более эффективно производить настройки двигателя на всех режимах его работы.

#### 5.4 Токсичность силового агрегата при использовании водорода

Ужесточение требований к современным автомобильным двигателям вынуждает пересмотреть требования к экономичности, мощности и токсичности. По этой причине была поставлена задача рассмотреть возможность использовать водород, как добавку к основному топливу и влияние его на состав в отработанных газах.

На рисунках 5.22–5.24 приведены сравнительные результаты измерений объёмной концентрации  $CO$ ,  $CH$  и  $NO_x$  в случаях без добавления водорода и с добавлением. Все графики отвечают требованиям по всем параметрам, например, коэффициенту избытка воздуха и нагрузке, что позволяет сравнивать их данные.

График рисунка 5.22 показывает, что при работе на ХХ с добавлением водорода происходит изменение состава отработанных газов по всем нормативным составляющим. Прежде всего наибольшие изменения происходят по выбросам углеводорода, а именно при добавлении водорода в пределах  $H=0,2$  кг/ч приводит к уменьшению содержания углеводорода  $\alpha = 1,4$  с 1000 ppm до, примерно, 250 ppm, т.е. в 4 раза. Наименьшее количество содержания углеводорода в отработанных газах отмечается при  $\alpha$  порядка  $\alpha= 1,2 - 1,3$  и равна величине по содержанию углеводорода 130 ppm (см. таблицы А1-А3).

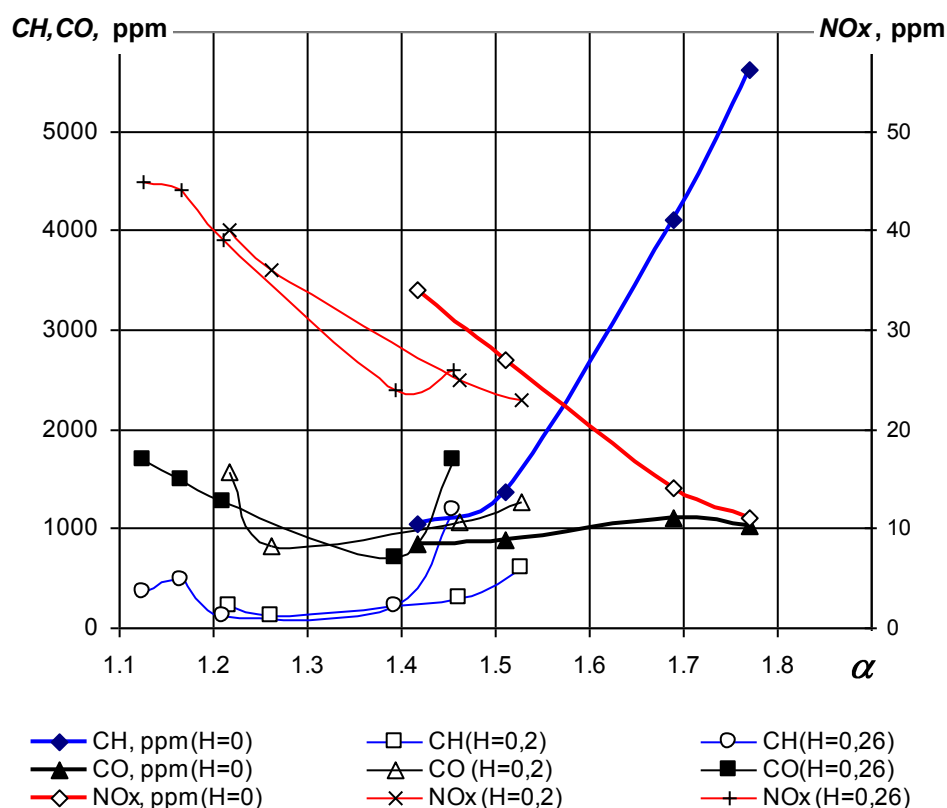


Рисунок 5.22 - Регулировочная характеристика по составу смеси ( $n=800$  об/мин,  $P_e=0$ ,  $\gamma_{O_2}=0^\circ$ ).

Значительное уменьшение углеводорода при использовании водорода безусловно говорит о малом уровне подготовки и протекании процесса сгорания топлива - природного газа при работе силового агрегата на данном режиме. Чтобы повысить характеристики работы силового агрегата на режимах необходимо проведение ряда комплекса работ, включающих в себя доводку рабочего процесса, которую необходимо делать путём определения или простого измерения давления в цилиндре двигателя [19]. Система добавления водорода в топливную систему силового агрегата автомобиля недостаточно изучена и не доработана, она достаточно дорогостоящая. Варианты и направления для доработки системы представлен в разделе 6.

Проведенный анализ результатов замеров по содержанию углекислого газа в выхлопных газах позволяет заметить, что количественная концентрация подаваемого компонента меняется незначительно, что определено той

величиной, которая принята при калибровках (значение  $\alpha$ ). Тем не менее, учитывая тот факт, что достаточно большое снижение массовых долей выбросов с отработанными газами (см. рисунок 5.1) можно также сказать о положительном результате воздействия водорода при горении.

Подтверждено, что добавление водорода ведет за собой к повышению температуры горения топлива в цилиндре двигателя и как следствие, к увеличению содержания в отработанных газах окислов азота. Что способствует обогащению смеси.

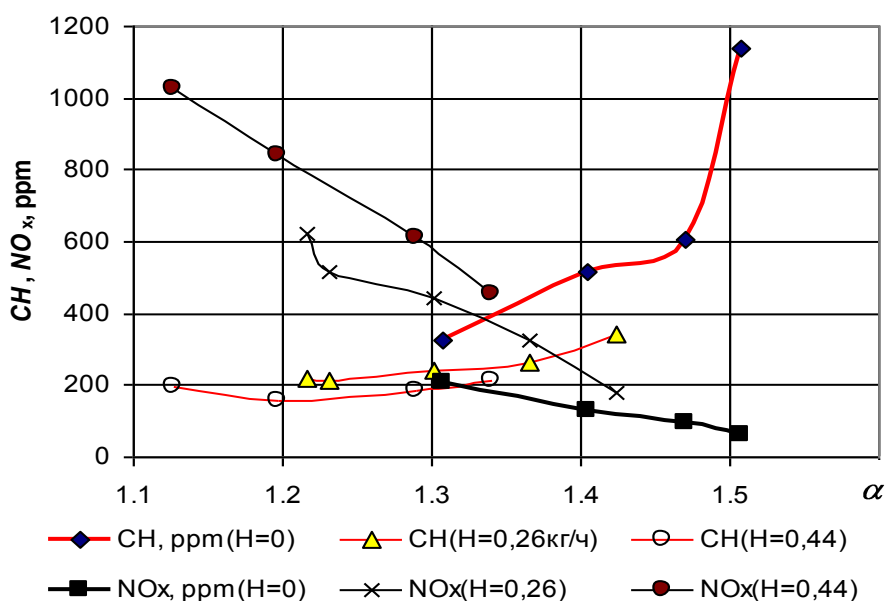


Рисунок 5.23 – Регулировочная характеристика  
( $n = 1500$  об/мин,  $P_e = 1,46$  кг/ч,  $\text{УОЗ} = 15^\circ$ )

По графику на рисунке 5.23 можно наблюдать изменения объёмных выбросов углеводорода и  $NO_x$  по коэффициенту переизбытка воздуха при оборотах коленчатого вала  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  и давлении  $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$ . Из-за того, что показатели углекислого газа незначительные от  $\alpha$  и  $H$ , то они в графики не приведены (см. таблицы приложения А). На данном графике видно, что добавление водорода ведет к уменьшению показателей углеводорода, в пределах действия  $\alpha$  от 1,3 до 1,5, при этом отмечается их постоянный уровень. Уменьшение выбросов углеводородов при  $\alpha$  равном  $\alpha = 1,4$  составляет 40%,

$NO_x$ , при этом повышается давление от 120 ppm до 250 ppm, что составляет 52%, это связано с увеличением температуры горения топливной смеси в цилиндрах силового агрегата и соответствует приведенным данным.

Из показателей графиков можно сделать следующий вывод, что при увеличении количества водорода от  $H=0,26$  кг/ч до  $H=0,44$  кг/ч приводит к незначительному изменению в сторону уменьшению выбросов углекислого газа и  $NO_x$ .

Так на рисунке 5.24 показаны результаты замеров углекислого газа и  $NO_x$  при работе двигателя на мощностных режимах.

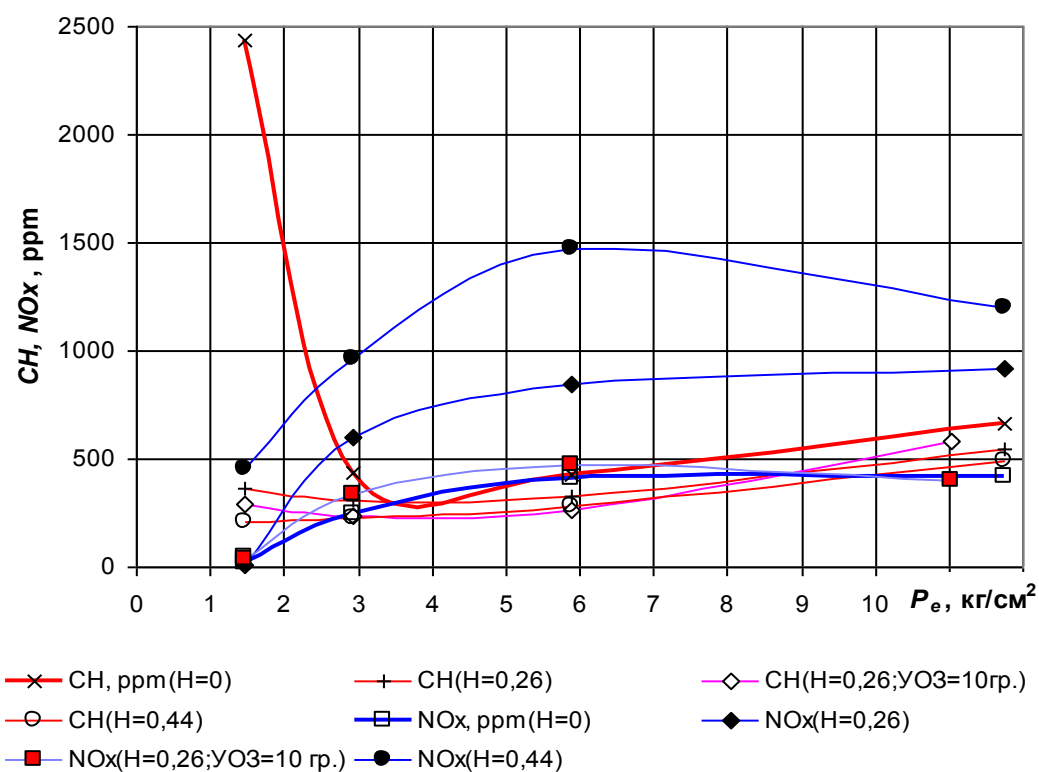


Рисунок 5.24 Нагрузочная характеристика

( $n = 1500$  об/мин,  $P_e = 1,46$  кг/ч, УОЗ = var)

Также можно отметить, что при добавлении водорода и повышении температуры, и уменьшении  $\alpha$  (см. рисунок 5.11) растет выброс  $NO_x$ . При изменении опережения зажигания с  $15^\circ$  до  $10^\circ$  положение коленчатого вала и

добавление водорода в объеме 0,26 кг/ч выбросы  $NO_x$  снижаются практически в два раза, а при показателях, как показано выше (рисунок 5.15), сохранены показатели такие как энергетические и экономические.

Образование  $NO_x$ , отмечается при работе силового агрегата на холостом ходе, это видно по полученным показателям нагрузочных характеристик. А именно, на таблице А1 что при нагрузке  $P_e = 1,46$  кг/ч, минимально снятой по данной характеристике, так же отмечается уменьшение  $NO_x$  при добавлении водорода в объеме  $H = 0,26$  кг/ч, т.е приведенные выше результаты анализа, подтверждают, что при работе силового агрегата на ХХ, выравнивание водородом полей концентраций топливной смеси при низкой частоте вращения вала силового агрегата, а следовательно, и её турбулентность.

По графику на рисунке 5.24 можно наблюдать кардинальное влияние добавления водорода на процесс образования углеводорода. В диапазоне нагрузок  $P_e = 1,46 - 3,0$  кг/см<sup>2</sup> отмечается значительное уменьшение выбросов, в объеме, более чем в 9 раз при  $P_e = 1,46$  кг/см<sup>2</sup>, это говорит об особенностях конструкции двигателя и настройках в рабочем процессе при работе силового агрегата на ХХ и малых нагрузках. При увеличении нагрузки, снижение углекислого газа остается практически постоянным неизменяемым с относительной величиной порядка 40 %.

Исследования также показали, что при изменении угла опережения зажигания в рассмотренном диапазоне при вводе водорода показывает его малое влияние на выбросы углеводорода, хоть и имеется незначительное снижение углеводорода в отработанных газах (см. рисунок 5.24).

Изменение содержания углекислого газа под нагрузочными характеристиками показывает небольшое влияние, как добавление водорода, так и изменение угла опережения зажигания, что определяется величиной  $\alpha$ , значения которой находятся в области обедненных смесей (см. таблицы приложения А) и небольшим расходом водорода.

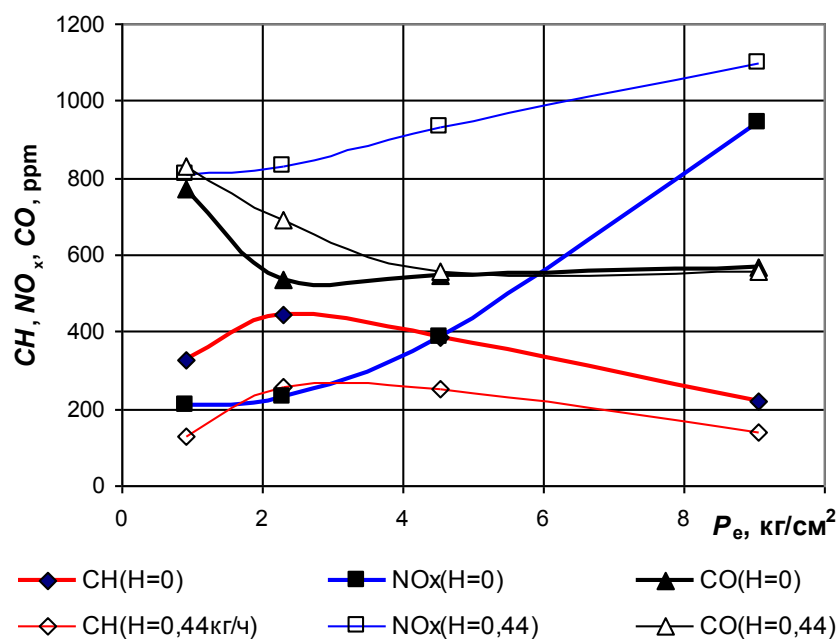


Рисунок 5.25 – Нагрузочная характеристика  
( $n = 2200$  об/мин,  $\text{УОЗ} = 18^\circ$ ).

На графике рисунка 5.25 представлены показания замеров и данные замеров углекислого газа, углеводорода и  $NO_x$  по нагрузочно технической характеристике при оборотах коленчатого вала  $n = 2200$  об/мин при работе силового агрегата по штатным калибровкам на природном газе и с добавлением водорода. По данным графиков можно наблюдать довольно большие падение по всем режимам при добавлениях водорода и выбросов углеводорода (в среднем в 2 раза), фактически небольшое изменение углекислого газа и большое увеличение выбросов  $NO_x$  (приблизительно в 4 раза).

Путем проведения практических испытаний мы получили определенные результаты, по которым можно сделать определенный вывод, что технические характеристики силового агрегата (стандартного) при добавлении водорода дают эффективные показатели, которые способствуют к принятию решения по модернизации уже выпускаемых газовых силовых агрегатов под конкретные потребительские характеристики генератора водорода.

Принимая во внимание особенности поведения водорода при рабочих процессах в двигателе, а именно протекание химической реакции при подаче



минимальных порций водорода на режимах, когда небольшая частота вращения коленчатого вала и при малых нагрузках. Последующая увеличивающаяся относительная доля водорода к основному топливу, а в дальнейшем и перехода к полному его замещению основного топлива, а также трудности в выработке водорода непосредственно в самом автомобиле. Можно определить необходимое его количество (водорода), с решением главной задачи по снижению вредных выбросов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{NO}_x$ ...), имеющих в отработанных газах, попадаемых в атмосферу, и необходимое для силового агрегата, выраженное в потреблении водорода, в пределах  $H = 0,2 \text{ кг/ч}$ .

## 6 Способы улучшения показателей газового двигателя и рекомендации к добавлению водорода

Варианты и способы по снижению количества выбросов токсичных веществ только транспортом, отражено во многих источниках [6,19 и др.]. Только некоторая их часть приведена в разделе 3 данной работы. Основная проблема, которая замедляет процесс внедрения данных конструкций и разработок в общие массы - является большая трудоёмкость по модернизации уже выпускаемого двигателя, необходимость в использовании сложных технологий, например, снятия характеристик двигателя, вне специальной лаборатории, а иногда и невозможность применения необходимого конструкторского решения. Один такой случай уже рассматривался выше, а именно, для эффективного прохождения процесса сгорания ТС необходимо использовать многосвечное зажигание, особенно это применимо для больших и сложных камер сгораний. Это требует индивидуальный подход в каждом случае сложнейшие и достаточно дорогостоящие изменения в конструкции головки блока цилиндра, но эти изменения могут дать малоэффективные результаты, вследствие неверного конструкторского решения. Прежде всего это связано с тем что, решения по изменению, доработки конструкции, как правило принимается методом проб и ошибок, полагаясь только на теорию. Так же это связано с тем, что существующая конструкция головки блока спроектирована и разработана для другого вида топлива, а, следовательно, рассчитана на иные процессы его горения. Применены другие принципы расположения свечей зажигания.

В настоящее время используется один из методов по снижению токсических веществ в отработанных газах, а именно применение катализатора. Катализатор направлен на нейтрализацию вредных веществ в отработанных газах, которые уже вышли из двигателя, а не сгорели в процессе горения в самом двигателе. Обычно это сказывается на ухудшение экономичности, возрастает расход топлива на 3-5%, падает мощность двигателя. По этой

причине в настоящее время ведутся теоретические и практические работы, направленные на изучении новых решений по улучшению экологических показателей двигателей внутреннего сгорания.

Из всего многообразия способов оптимизации процессов горения топливной смеси в двигателе на обедненных смесях можно рассмотреть процесс HCCI – процесс (Homogen Charge Compression Ignition - воспламенение гомогенной смеси от сжатия). Данный способ широко исследуется в научных лабораториях. Его принцип действия основан на том, что воспламенение смеси легкого топлива происходит во время такта сжатия, что в данном случае играет основную роль в процессе воспламенения топливовоздушной смеси. Принцип работы исследуемого двигателя основан на конвертировании дизельного двигателя с небольшими изменениями в котором не затрагиваются основные узлы и детали (блок цилиндров, кривошатунный механизм...). Изменения не должны повлиять на такие параметры, как долговечность (ресурс) и прочность при работе силового агрегата, основанным на принципе действия циклов Дизеля и Отто. Такие задачи в нашем случае уже разрешены.

При таком принципе работы процессов, топливная система ничем не отличается от систем обычного ДВС, т.е. воспламенением от искры свечи зажигания: на впуске ближе к ВМТ в цилиндры подается гомогенный заряд. Процесс воспламенения топлива организуется по принципу дизельной установки, т.е. от температуры сжатой ТС. Такой принцип процесса позволяет максимально осуществлять выделение тепла во всем объёме камеры сгорания практически мгновенно. За счет протекания химических реакций выделяется тепло, ключевым и наиболее важным моментом во всем процессе является только температура в самой камере сгорания. Здесь для процесса горения не имеет значение распространения турбулентного горения в камере сгорания от точки воспламенения, как в силовой установке с воспламенением от искры свечи зажигания. В таких случаях такой коэффициент избытка воздуха по разным значениям может быть  $\alpha = 4.0$ , а содержание остывших газов можно оставаться на уровне от 50 до 70%, т.е. значениям при которых силовой агрегат

с искровым зажиганием просто не работает. При этом выбросы  $\text{NO}_x$  оксида азота в отработанных газах приближаются к нулевым, а экономичность при этом растет. Однако недостатком в работе на высокообогащенной топливной рабочей смеси (воздухом или отработанными газами) является значительное увеличение количества несгоревших углеводородов (холодные стенки камеры сгорания), падение мощности двигателя из-за снижения температуры цикла.

Контролирование и управление законом полного сгорания топлива является основной проблемой при разработке НСЦИ – процесса в двигателе. По разным данным из заявлений зарубежных специалистов данную проблему можно решить с помощью разбавления топливной смеси отработанных газов (регулированием рециркуляции ОГ) и подогревом воздуха, что позволяет выявить начало воспламенения топливной смеси и длительность его сгорания, т.к. разбавление смеси тем или иным компонентом непременно влияет на скорость химических реакций.

Заметим, что одним из достоинств данного способа является то, что исследуемый в лаборатории двигатель (КАМАЗ – 820.53-260) сделан на базе дизельной силовой установки и поэтому есть возможность в полном объеме проверить систему НСЦИ – процесса связана только с установлением законов выгорания рабочей смеси. Тем не менее для практического применения обсуждаемого способа необходимо проведение большого объема экспериментальных исследований.

Метод доработки силового агрегата, представленный в настоящее время не получил практического применения по двум основным причинам: необходимы эксплуатационные испытания, отсутствие технологичных методов получения водорода как в стационарных условиях, так и автономном варианте, т.е. на автомобиле).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов выполненных работ можно сделать следующие выводы:

В соответствии программой и методикой испытаний подготовлены и проведены на моторном стенде, экспериментальные работы по исследованию улучшения показателей добавок водорода, с помощью которых можно увидеть не только его эффективность, но и возможность использования данного способа по уменьшению токсичности силовом агрегате КАМАЗ – 820.52-260.

В результате исследования работы двигателя внутреннего сгорания с добавлением водорода, по характеристикам, оказывающим регулировочное действие (на саму смесь, ее состав и угол опережения зажигания) пришли к выводу, что на режимах, подвергшихся исследованию заметны кардинальные изменения показателей силового агрегата:

- согласно условию работы силового агрегата, на ХХ, где коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,4$ , добавления водорода 0,2 кг/ч, расход природного газа снизится до 30% и останется на этом уровне при изменении значения  $\alpha = 1,5$ ; объемные выбросы углеводорода будут понижаться в четыре этапа, концентрация выбросов углекислого газа останется неизменной, а вот значения оксида азота понизятся до 30%. Важно отметить снижение выбросов NO наблюдается при обогащениях смеси;

- согласно условию работы силового агрегата, на нагрузочном режиме  $n = 1500$  об/мин и нагрузке  $P_e = 1,46$  кг/см<sup>2</sup> и добавлении водорода  $H = 0,26$  и 0,44 кг/ч расход природного газа снижается. При работе с регулировочными характеристиками показатели составят около 11%, вырастет КПД 3,5÷10%, до 40% проявится снижение углеводорода, хотя это повлечет за собой повышение выбросов оксида азота приблизительно на 50 % и выше;

- проведенные исследования влияния УОЗ при добавках водорода дают возможность улучшить их: выбросы СН и NO<sub>x</sub> при условии работы в экономичном режиме, к примеру, при добавках водорода и снижении угла

опережения зажигания на режиме  $n = 1500$  об/мин и  $P_e = 1,46$  кг/ч до  $10^\circ$  эффект КПД возрастет до 11%.

Исследование работы силового агрегата при добавках водорода по нагрузочным характеристикам показало:

- если  $n = 1500$  об/мин ( $\text{УОЗ}=15^\circ$ ), а  $H = 0,26$  и  $H = 0,44$  кг/ч имеем значительное понижение расхода природного газа на нагрузках до  $P_e = 3$  кг/см<sup>2</sup>, к примеру, если  $P_e = 1,46$  кг/см<sup>2</sup> на 30% при  $H = 0,26$  кг/ч и 35% при  $H = 0,44$  кг/ч, то положительный эффект КПД возрастет от 5 до 13 %. Влияние добавки водорода снизится, а расход природного газа в данном случае составит 1 - 2%.

- влияние, которое оказывают добавки водорода на токсические показатели остается таким же сильным на небольших нагрузках, к примеру, если  $P_e = 1,46$  кг/ч ( $n = 1500$  об/мин,  $\text{УОЗ}=15^\circ$ ) снижение выбросов углеводорода разбито на 9 этапов и при увеличении нагрузки больше 3 кг/см<sup>2</sup> снизится до 40%. Ростом нагрузки при  $\text{УОЗ} = 15^\circ$  увеличивают выбросы NO;

- влияние, которое оказывают добавки водорода при нагрузочной характеристике, где  $n = 2200$  об/мин ( $\text{УОЗ} = 18^\circ$ ) равны стандартным показателям с меньшим количественным выражением, к примеру, по мере возрастания нагрузки уменьшение расхода ПГ будет варьироваться от 10 % до 2 %, при условии стабильного эффективного коэффициента полезного действия.

Данные исследования помогли выделить нужную область параметров силового агрегата по частоте вращения коленчатого вала, коэффициенту избытка воздуха, нагрузке и УОЗ в тех параметрах у которых более активно наблюдается влияние водорода на снижение расхода природного газа и выбросов углеводородов в правильном количестве, данное количество можно определить с помощью современных технологий в объеме  $H = 0, 2$  кг/ч.

С помощью данных исследований получены результаты по использованию аппроксимации и «интерполяции», их можно использовать при расчётах уровня токсичности, согласно официальной методике оценки.

В ходе проведенных исследований были получены методы улучшения показателей силового агрегата, особое значение имеет наиболее актуальный метод с использованием добавок водорода в виде смеси ПГ и пятипроцентного водорода для заправки транспортных средств. Не исключено использование ряда других методов, имеющих хорошие показатели, но требующие детальной исследовательской и практической доработки.

Работу по использованию добавок водорода следует вести и далее, провести исследование при смешивании топливовоздушной смеси, чтобы понизить выбросы оксида углерода, что направлено на освоение новых научных подходов и проведение практических работ по калибровке ЭСУД при работе силового агрегата на смеси, состоящей из природного газа и водорода.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Все ГОСТы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://vsegost.com/> (08.03.2017).
2. The Clean Fuels Report, J.E. Sinor Consultants Inc., Niwot, Colorado, June 1992.
3. Справочная книга радиолюбителя-конструктора: В 2-х книгах. Гн. 2/ Р. Г. Варламов, В. Я. Замятин, Л. М. Капчинскийи др.; Под ред. Н. И. Чистякова. - 2-е изд., исправ. и доп. - М.: Радио и связь, 1993. - 336 л.: - (Массовая радио-библиотека; Вып1196).Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей / Киев.: Наука думка, 1984.
4. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. Изд. 2-е – перераб. – М.: Машиностроение. – 1981.
5. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие / А.Р. Кульчицкий; Владимирский гос. университет. Владимир, 2000.
6. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени; перевод с англ. Ю.Ф. Дитикина. – Машиностроение. – 1981.
7. Журавлев А.А., К.Б. Мазель. Преобразователи постоянного напряжения на транзисторах. - М.: Энергия, 1974 - 89с.Хитрин Л.И. Физика горения и взрыва / Л.И. Хитрин; М.: - 1955.
8. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. - М.: Энергия, 1968. - 152 с.HeywoodJ.B.: InternalCombustionEngineFundamentals. McGraw-HillBookCompany, 1994.
9. Барун В.Н., Азаматов Р.А., Трыков В.А. и др. Автомобили КамАЗ техническое обслуживание и ремонт. - М.: Транспорт, 1984. - 251с.Воинов А.И. Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях / А.И. Воинов; М.: Машиностроение. – 1977.
10. Автомобили КамАЗ. Эксплуатация и техническое обслуживание /Под ред. Л.Р. Пергамент. - М.: Недра, 1981.- 424с.WentworthJ.T. SAE. Combust., Sci. Technol., 4, 970100. – 1970.



11. Вородяню В.Н. Первичные измерительные преобразователи в автомобильных электронных системах (датчики на автомобиле): Учебное пособие. - Челябинск: ЧГТУ, 1996. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов / Я.Б. Зельдович; М.: АН СССР. – 1954.
12. Двигатели внутреннего сгорания: учебник для вузов по спец. «двигатели внутреннего сгорания» / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. Изд. 4-е – перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 1984.
13. Borland, M. and Zhao, F. (2002) Application of Secondary Air Injection for Simultaneously Reducing Converter-In Emissions and Improving Catalyst Light-Off Performance. SAE Technical Paper No. 2002-01-2803.
14. Cheng, W. K. and Santoso, H. (2002) Mixture Preparation and Hydrocarbon Emissions Behaviors in the First Cycle of SI Engine Cranking. SAE Technical Paper No. 2002-01-2805.
14. Вородяню В.Н. Первичные измерительные преобразователи в автомобильных электронных системах (датчики на автомобиле): Учебное пособие. - Челябинск: ЧГТУ, 1996..
16. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л., «Машиностроение», 1975.
17. Щелкин Л.Н. Теория горения и взрыва. М.: МГУ, 1957. Русаков М.М. Пределы стабильного сгорания обедненных бензовоздушных смесей в ДВС при различных способах интенсификации / М.М. Русаков и др.; Сборник трудов XI симпозиума по горению и взрыву. – 1996.
18. Kido H. Improvement of Lear Hydrocarbon mixtures combustion performance by Hydvoqen Addition and Its. Mechanisms / H. Kido, S. Huanq, K. Tanoue and T. Nitta; International Symposium COMODIA. – 1994.
19. Расчетные результаты математического моделирования горения бензовоздушных смесей с различными значениями коэффициентов избытка воздуха при добавках водорода: отчет о работе по государственному контракту № K0121(21-98) Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего

- образования и фундаментальной науки на 1997-2000 годы» / ТПИ – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. – 1999.
20. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.
21. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф; Л.: Энергоавтомиздат, Ленинград. отделение. – 1985
22. Жуковский А.Е. Испытание жидкостных ракетных двигателей: учеб. пособие для авиационных спец. вузов / А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.Я. Левин, В.В. Оporочков; под ред. В.Я. Левина. – М.: Машиностроение. – 1975.
23. Определение соотношения бензин-водород для обеспечения устойчивой работы поршневого ДВС на бедных смесях/ Л.Н. Бортников и др.; Сборник СГАУ вып. 3. – 2000.
24. 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. ScienceTechnicalCenter «ТАТА», Саров – 2004.
25. Sanders S.T., Kim T., Gas Temperature Measurements During Ignition in an HCCI Engine. SAE Paper 2003-01-0744, 2003.
26. Kraft M., Bhave A. Numerical Analysis a Natural Gas Fuelled HCCI Engine with Exhaust Gas Recirculation, Using a Stochastic Reactor Model. Mauss Cambridge Center for Computational Chemical Engineering, Preprint № 8 ISSN 1473-4273, 2003.
27. Бортников Л.Н., Русаков М.М., Шайкин А.П. и др. Экспериментальное и расчетное исследования горения БВВС с добавками водорода в современных двигателях/ Химическая физика процессов горения и взрыва. XII симпозиум по горению и взрыву. Часть III. РАН: Черноголовка, 2000.

28. Павлов Денис Александрович. Снижение выбросов углеводородов на режимах пуска и прогрева бензинового двигателя добавкой водорода в топливовоздушную смесь : Дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 Тольятти, 2005 185 с. РГБ ОД, 61:06-5/1245.
29. Мисбахов Ринат Шаукатович. Влияние добавок водорода на технико-экономические и экологические показатели газовых и дизельных двигателей : диссертация ... кандидата технических наук : 05.04.02 / Мисбахов Ринат Шаукатович; [Место защиты: Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева].- Казань, 2010.- 165 с.: ил. РГБ ОД, 61 10-5/2367.
30. Медведев Геннадий Валериевич. Снижение вредных выбросов дизелей в СВС - каталитических блоках нейтрализаторов путем организации селективной очистки : 05.04.02 / Медведев Геннадий Валериевич; [Место защиты: Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова].- Барнаул, 2009.- 208 с.: ил. РГБ ОД, 61 10-5/771.

# Приложение А

Таблица А1 – Первичные результаты экспериментальных исследований

$n, \text{мин}^{-1}$	$M_e, \text{кг} \cdot \text{м}$	$N_e, \text{кВт}$	$T_{0\text{возд.}}, \text{С}$	$Q_{\text{возд}}$	$P_k, \text{кг/см}^2$	$\varphi_{\partial p}, \%$	$P_e, \text{кг/см}^2$	$Q_e, \text{кг/ч}$	$G_e, \text{кг/ч}$	$T_{\text{ТКР}}, \text{прав}$	$T_{\text{ТКР}}, \text{лев}$	$\text{УОЗ}, \text{град}$	$\alpha_I$	$H_2, \text{кг/ч}$	$\alpha (\text{с } H_2)$	$\text{СН}, \text{ppm}$	$\text{NO}_x, \text{ppm}$	$\text{CO}, \text{ppm}$
1500	13.6	21	32	212	0.09	17.9	1.46	9.5	254	530	503	15	1.59	0	1.59	1656	46	904
1500	13.6	21	32	175	0.05	16.0	1.46	7.9	211	506	484	15	1.6	0.26	1.493	364	13.5	657
1500	13.6	21	32	256	0.14	19.7	1.46	11	307	574	539	10	1.6	0	1.601	2436	20	780
1500	13.6	21	33	202	0.08	17.4	1.46	9	243	551	519	10	1.61	0.26	1.52	289	40	488
1500	110	170	32	705	0.81	47.5	11.8	35	848	600	588	15	1.45	0	1.445	667	417	445
1500	110	170	32	681	0.77	45.9	11.8	34	820	595	583	15	1.45	0.26	1.425	545	922	434
1500	55	84.8	34	369	0.28	24.5	5.88	19	444	581	568	15	1.39	0	1.389	423	412	430
1500	55	64.8	33	354	0.25	24.0	5.88	18	426	569	555	15	1.39	0.26	1.362	326	849	453
1500	27.5	42.3	34	237	0.11	18.9	2.94	12	285	543	523	15	1.4	0	1.4	436	243	570
1500	27.5	42.3	34	215	0.09	18.1	2.94	11	259	539	517	15	1.4	0.26	1.339	313	601	637
1500	27.5	42.3	35	229	0.11	18.6	2.94	12	276	559	536	10	1.4	0.26	1.334	233	335	569
1500	55	84.8	35	374	0.31	24.0	5.88	19	450	599	585	10	1.39	0.26	1.358	261	472	393
1500	103	159	35	707	0.84	46.7	11	35	850	637	615	10	1.44	0.26	1.415	582	403	365
1500	11	170	34	665	0.73	46.4	11.8	33	800	592	578	15	1.44	0.44	1.409	487	1203	406
1500	55	84.8	35	344	0.24	23.2	5.88	18	413	586	572	15	1.39	0.44	1.324	283	1473	406
1500	27.5	42.3	35	206	0.09	17.5	2.94	11	248	550	532	15	1.39	0.44	1.288	230	967	546
2200	8.5	19.1	36	213	0.11	17.3	0.91	11	256	573	557	18	1.34	0	1.335	329	209	771
2200	8.5	19.1	36	193	0.1	16.4	0.91	10	232	571	562	18	1.34	0.44	1.237	131	807	833
2200	21.4	48.4	35	327	0.21	21.4	2.29	17	393	590	573	18	1.4	0	1.408	442	228	537
2200	21.4	48.4	35	299	0.18	20.5	2.29	15	359	587	571	18	1.4	0.44	1.33	259	828	690
2200	42.4	95.7	35	489	0.45	24.7	4.53	25	588	616	599	18	1.4	0	1.398	385	385	545
2200	42.4	95.7	35	466	0.41	24.3	4.53	24	561	613	599	18	1.41	0.44	1.359	253	933	556
2200	84.7	191	35	849	0.99	31.0	9.06	44	1021	635	620	18	1.39	0	1.389	218	944	567
2200	84.7	191	35	838	0.94	31.4	9.06	43	1008	630	612	18	1.41	0.44	1.379	140	1100	557

Таблица А2 – Первичные результаты экспериментальных исследований

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$M_e$ , кг·м	$N_e$ , кВт	$T_0$ возд., С	$Q$ возд	$P_k$ кг/см <sup>2</sup>	$\varphi_{др}$ , %	$P_e$ , кг/см <sup>2</sup>	$Q_2$ , кг/ч	$G_e$ , кг/ч	$T_{TKP}$ , прав	$T_{TKP}$ , лев	УОЗ, град	$\alpha_I$	$H_2$ , кг/ч	$\alpha$ (с $H_2$ )	CH, ppm	NO <sub>x</sub> , ppm	CO, ppm
1500	13.6	21	32	165	0.06	15.3	1.46	9	198	527	512	15	1.31	0	1.308	327	210	697
1500	13.6	21	33	179	0.06	16.2	1.46	9.1	215	526	508	15	1.41	0	1.405	518	129	731
1500	13.6	21	33	187	0.07	16.3	1.46	9.1	225	528	509	15	1.47	0	1.47	606	95	730
1500	13.6	21	34	204	0.08	17.4	1.46	9.7	246	530	506	15	1.51	0	1.508	1140	59	804
1500	13.6	25.5	35	145	0.05	14.8	1.77	8	174	516	509	15	1.3	0.26	1.217	216	625	749
1500	13.6	21	35	145	0.05	14	1.46	7.9	174	507	498	15	1.3	0.26	1.231	213	515	736
1500	13.6	21	35	153	0.05	14.4	1.46	7.9	184	506	496	15	1.38	0.26	1.302	240	444	732
1500	13.6	21	35	160	0.05	14.9	1.46	7.9	193	517	494	15	1.44	0.26	1.366	266	327	715
1500	13.6	21	36	171	0.05	15.7	1.46	8.1	206	505	486	15	1.52	0.26	1.424	340	180	670
1500	13.6	21	36	136	0.05	13.4	1.46	7.8	164	505	501	15	1.25	0.44	1.127	197	1026	1260
1500	13.6	21	37	139	0.05	13.8	1.46	7.5	168	500	496	15	1.34	0.44	1.196	159	843	806
1500	13.6	21	37	149	0.05	14.3	1.46	7.4	179	495	489	15	1.45	0.44	1.29	185	611	710
1500	13.6	21	37	155	0.05	14.8	1.46	7.4	186	497	484	15	1.5	0.44	1.341	211	453	702
1500	13.6	21	37	192	0.02	16.8	1.46	11	231	562	544	10	1.3	0	1.296	288	83	572
1500	13.6	21	37	160	0.02	15.1	1.46	8.8	192	545	529	10	1.29	0.26	1.227	163	245	584
1500	13.6	21	37	162	0.02	15.1	1.46	8.3	195	508	500	20	1.39	0	1.397	506	391	805
1500	13.6	21	37	151	0.02	14.6	1.46	7.8	182	481	477	20	1.4	0.26	1.303	315	731	896

Таблица А3 – Первичные результаты экспериментальных исследований

$n, \text{мин}^{-1}$	$M_e, \text{кг} \cdot \text{м}$	$N_e, \text{кВт}$	$T_0$ возд., °C	$Q$ возд	$P_k$ кг/см <sup>2</sup>	$\varphi_{др},$ %	$Q_2,$ кг/ч	$G_e,$ кг/ч	$T_{TKP},$ прав	$T_{TKP},$ лев	$\alpha_I$	$H_2,$ кг/ч	$\alpha$ (с H <sub>2</sub> )	CH, ppm	NO <sub>x</sub> , ppm	CO, ppm
800	0.1	0.08	34	67	0	8.4	3.4	81	420	416	1.41	0	1.41	1039	34	845
800	0.1	0.08	34	45	0	6.3	2.3	55	345	338	1.4	0.16	1.25	214	40	1573
800	0.1	0.08	34	44	0	6.3	2.3	53	328	326	1.4	0.26	1.12	355	45	1695
800	0.1	0.08	34	44	0	6.3	2.2	53	315	318	1.44	0.26	1.16	479	44	1482
800	0.1	0.08	33	78	0	9.4	3.7	94	378	371	1.49	0	1.5	1.375	27	882
800	0	0	33	47	0	6.6	2.3	57	330	332	1.5	0.16	1.29	126	36	829
800	0	0	33	46	0	6.3	2.2	55	316	318	1.49	0.26	1.21	129	39	1271
800	0	0	33	104	0	11.7	4.4	125	373	368	1.69	0	1.68	4102	14	1110
800	0	0	33	59	0	6.8	2.5	71	343	346	1.68	0.16	1.5	304	25	1063
800	0	0	33	56	0	7.1	2.4	68	333	333	1.7	0.26	1.39	223	24	699
800	0	0	33	119	0	12	4.8	143	375	371	1.76	0	1.76	5626	11	1017
800	0	0	33	57	0	5.4	2.3	69	361	358	1.78	0.16	1.57	597	23	1268
800	0	0	33	59	0	7	2.4	71	339	337	1.78	0.26	1.45	1188	26	1701

## Приложение Б

### Таблицы нагрузок на электрическом тормозе динамометра для различных контрольных масс автомобиля

Мощность, поглощаемая электрическим тормозом динамометра  $P$ , кВт, без учёта нагрузки от автомобиля рассчитывается по формуле

$$P = Fr \times V_a / 1000,$$

где  $V_a$  - скорость автомобиля, м/с;

$Fr$  - сила, поглощаемая электрическим тормозом динамометра без учёта нагрузки от автомобиля, Н, рассчитывается по формуле

$$Fr = a + b \times V_a^2,$$

где  $a$ ,  $b$  - коэффициенты.

Таблица Б.1- Контрольная масса автомобиля  $M=1020$  кг

<b><math>V_a</math>, км/ч (м/с)</b>	<b><math>Fr</math>, Н</b>	<b><math>P</math>, кВт</b>	<b>Время <math>T</math>, с</b>
120 (33,3)	599	19,96	4,73
110 (30,6)	505	15,43	5,61
100 (27,8)	418	11,61	6,78
90 (25,0)	340	8,50	8,34
80 (22,2)	270	5,99	10,50
70 (19,4)	208	4,04	13,62
60 (16,7)	154	2,57	18,35
50 (13,9)	109	1,51	25,97
40 (11,1)	72	0,79	39,34
30 (8,3)	43	0,36	65,61
20 (5,6)	23	0,13	125,48
10 (2,8)	10	0,10	277,23

Таблица Б.2 - Контрольная масса автомобиля М=1130 кг

<b>Va, км/ч (м/с)</b>	<b>Fr, Н</b>	<b>P, кВт</b>	<b>Время T,с</b>
120 (33,3)	630	20,99	4,98
110 (30,6)	530	16,19	5,92
100 (27,8)	439	12,19	7,14
90 (25,0)	357	8,93	8,79
80 (22,2)	284	6,31	11,07
70 (19,4)	219	4,26	14,36
60 (16,7)	162	2,69	19,34
50 (13,9)	115	1,59	27,38
40 (11,1)	76	0,84	41,47
30 (8,3)	45	0,37	69,18
20 (5,6)	24	0,13	132,33
10 (2,8)	11	0,03	292,53