

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

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Оценка эффективности применения водорода с учетом его
стоимости

Студент

А.А. Раджабеков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель
Консультанты

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.т.н., проф. А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

«_____» июня 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н. Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

«_____» июня 2017 г.

Тольятти 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Обзор эффективности добавка водорода.....	6
1.1 Обзор способов получения и хранения водорода.....	6
1.2 Обзор эффективности применения добавки водорода в автомобильных ДВС.....	7
1.2.1 Обзор результатов, представленных в диссертации Мисбахова Рината Шаукатовича.....	7
1.2.2 Обзор результатов, представленных в диссертации Павлова Дениса Александровича	10
1.2.3 Обзор результатов, представленных в диссертации Галышева Юрия Виталиевича.....	13
1.2.4 Обзор результатов, представленных в диссертации Талда Геннадий Борисович	17
1.2.5 Обзор результатов, представленных в диссертации Румянцева Виктора Валентиновича	20
1.2.6 Обзор результатов, представленных в диссертации Бортникова Лионида Никитовича	24
Вывод по главе 1	27
Глава 2 Анализ эффективности добавки водорода.....	28
Выводы по Главе 2.....	49
Глава 3 Обобщения стоимости добавки водорода	51
3.1 Водород и сжатый природный газ, смешенное тестируемое биотопливо. 51	
3.3 Новая технология переработки отходов пластмасс в углеводородное топливо в США	58
Выводы по Главе 3.....	60

Глава 4 Влияние добавки водорода на стоимость топлива в ДВС с искровым зажиганием	62
4.2 Оценка экономической эффективности добавки водорода в качестве активатора горения сжатого природного газа.....	64
Выводи по Главе 4	67
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	68
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	69
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	73

ВВЕДЕНИЕ

Применению водорода в ДВС посвящено большое количество экспериментальных работ, выполненных как отечественными авторами, как и за рубежом. Однако, практически все работы имеют исследовательский характер и не доведены до практического применения. Следует отметить, что все проведенные исследования четко показывают эффективность добавок водорода в ТВС с возможностью снижения токсичности ОГ при повышении экономичности. Сложность практического применения данного метода заключается в реализации системы хранения водорода на автомобиле или его получения с помощью бортового генератора.

Вместе с тем жесткость перспективных нормативов на автомобильные ДВС требует поиска новых путей и новых технологий решения данной проблемы. В связи с этим целью данной работы являлось получения достоверных данных о возможности снижения расхода топлива при добавке водорода с оценкой возможности его практического применения.

Целью магистерской работы является оценка влияния добавки водорода на стоимость потребляемого горючего при сохранении энергетических параметров работы двигателя.

Для достижения поставленной цели, необходимо выполнить следующие **задачи исследования**:

- 1 провести анализ возможности получения водорода и его стоимости в розничной продаже;
- 2 провести анализ экспериментальных данных по выявлению влияния добавки водорода на изменение расхода основного горючего;
- 3 выявить условия экономической эффективности применения водорода в качестве добавки к основному топливу.

Объектом исследования является процесс сгорания в ДВС.

Предметом исследования являются эффективность применения добавок водорода к основному топливу.

В работе были **использованы методы** статистической обработки известных экспериментальных данных, математического анализа, моделирования рабочих процессов ДВС.

Достоверность полученных результатов исследования обусловлена сходимостью полученных результатов и применением методов статистической обработки данных.

Научная новизна исследования состоит в полученных закономерностях влияния добавки водорода на экономические показатели работы ДВС.

Практическая ценность научных результатов заключается в предложенной методике оценки экономической эффективности добавки водорода на стадии проектирования новых силовых агрегатов, что позволит существенно снизить затраты на проведение испытаний автомобиля.

На защиту выносятся:

- 1 анализ экспериментальных данных по выявлению влияния добавки водорода на изменение расхода основного горючего;
- 2 условия экономической эффективности применения водорода в качестве добавки к основному топливу.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» ТГУ, а также на конференции, в 2016-2017 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 печатных работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертации состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 33 наименований. Работа изложена на 92 страницах машинописного текста, 40 приложениями, иллюстрированного 21 таблицей и 31 рисунками, общий объем составляет 92 страницы.

Глава 1 Обзор эффективности добавка водорода

1.1 Обзор способов получения и хранения водорода

В кандидатской диссертации Мисбахова Рината Шаукатовича приведен обзор способов получения и хранения водорода, рассмотрим его подробнее.

Между ведущих промышленных способ получения водорода нужно обозначит нижеследующие:

- водород методом электролиза
- водород методом каталитической конверсии углеводородов
- водород методом неполного окисления углеводородов
- водород разложением аммиака
- водород при высоких температурах (солнечная энергетика, атомная и др.)
- водород путем термохимического разложения воды
- водород из газов, образующихся при каталитическом риформинге, крекинге, пиролизе и других процессах
- водород методом высокотемпературного электролиза

В нынешние время главными изготовителями водорода на российском рынке представлены:

- ОАО "Новосибирский завод химконцентратов" (Новосибирск);
 - ФГУП "Ниихиммаш" (Пересвет, Московская обл.);
 - ЗАО "Научно-техническое агентство "Наука" (Москва);
 - ОАО "Логика" (Зеленоград, Московская обл.);
 - ОАО "Линде газ рус" (Балашиха, Московская обл.);
 - ЗАО "Самарский кислородный завод" (Самара);
 - ЗАО "Лентехгаз" (Санкт-Петербург);
 - ОАО "Редкинский опытный завод" (пос. Редкино, Тверская обл.).
- Главные поставщики водорода на российский рынок:
- ООО "Криоген" (Рязань);

ООО "ПГС-сервис" (Москва);
НПО "Мониторинг" (Балашиха, Московская обл.);
ООО "Мониторинг" (Санкт-Петербург);
ООО "АМГ" (Москва);
ООО "Уралкриогаз" (Екатеринбург);
Компания "Технические газы" (Республика Удмуртия, Ижевск);
Компания НИИ КМ (Москва).

Для масштабного внедрения водорода в качестве топлива для транспортных энергоустановок, нужно осуществить его общее и дешевое производство, еще создать эффективные и достоверные способы хранения припаса этого газа на борту транспортного средства в необходимом для обеспечения требуемой дальности автономного пробега. Решение данных задач сознательно вероятно, присутствие обстоятельств неоднократного повышения изготовления электричества с целью изготовления водорода. В этот период из числа ключевых способов сохранения водорода следует выделить следующие: водорода в углеродных наносистемах, водорода в инкапсулированном газовидном пребывании в пустые микросферах, пенометаллах и цеолитах, водорода в газовидном пребывании нажимом, водорода в водянистом пребывании в низкотемпературных емкостях, водорода в твердофазном сопряженном пребывании в интерметаллидах, водорода в адсорбированном пребывании в криоадсорбентах, водорода в электрохимических сопряженном пребывании в водянистых сферах, водорода в сочетанных концепциях.

1.2 Обзор эффективности применения добавки водорода в автомобильных ДВС

1.2.1 Обзор результатов, представленных в диссертации Мисбахова Рината Шаукатовича

В работе Мисбахова Рината Шаукатовича особое внимание уделяется исследованию горения и разработке ДВС для обедненных смесей водорода с

метаном. Возможности использования водорода совмещении с метаном либо иным недорогим горючим объединены с значимым усовершенствованием экономических и экологических характеристик ДВС.

Значимым минусом метана считается невысокая нормальная скорость горения сравнительно углеводородных топлив, то что выражается в пробелах воспламенения топливной смеси в камере сгорания двигателя, стимулированных её неустойчивым самовоспламенением, в особенности в режимах, определяемых невысокими частотами вращения и нагрузками.

Водород в качестве добавки к главному углеводородному горючему(метану), вследствие неповторимым физико-химическим свойствам, дает возможность в полном объеме скомпенсировать этот минус. Подобным способом, особенно изучения процессов горения смесей водорода с углеводородами, в особенности с метаном, необходимо рассматривать первенствующим течением формирования трудов в области горению сообразно к ДВС. Минусом двигателя, работающего в двухкомпонентном горючем, считается наиболее трудное обслуживание и эксплуатирование автомобиля. К превосходствам возможно причислить обстоятельство, того что неполная смена углеводородного горючего водородом предоставляет вероятность применять имеющиеся модели двигателей, уменьшить резерв водорода в борту автомобиля. В тоже период использование водорода существенно делает лучше экономические и токсические характеристики двигателя. Экспериментальные исследования велись в испытательном моторном стенде путём снятия регулировочных характеристик по составу смеси и U_{03} , а кроме того нагрузочных характеристик. Объем добавок водорода обуславливалась исходя с существенности получаемого по экономичности и токсичности ДВС результата и перспективой практической осуществлении бортового генератора водорода установленной производительности. Согласно экспериментальным сведениям, условный расход водорода при этом необходимо быть 3-6% с расхода углеводородного горючего, то что является для режимов небольших нагрузок

двигателя КамАЗ-820.52-260 (КАМАЗ - 820.53-260) значение режима $H_2=0,2-0,5$ кг/ч.

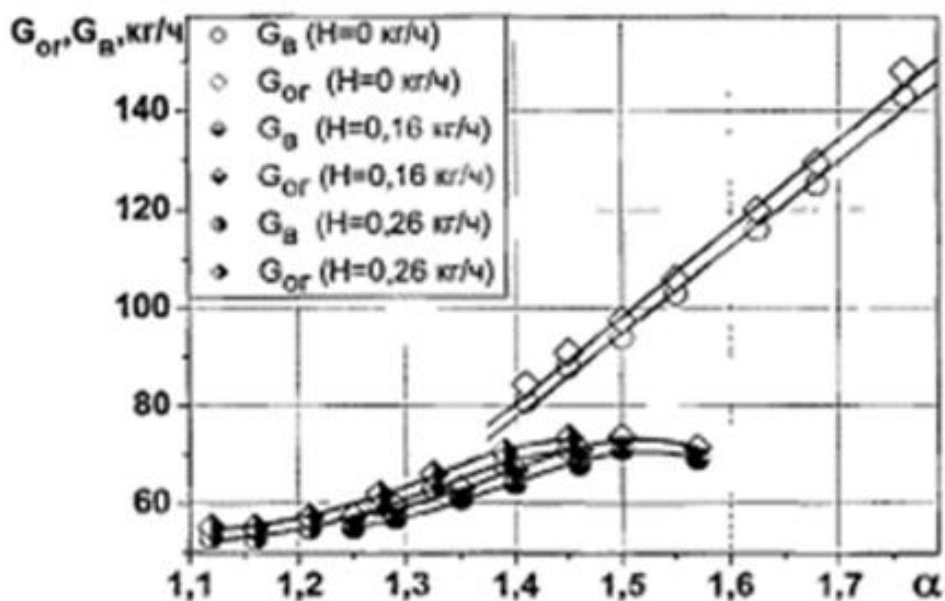
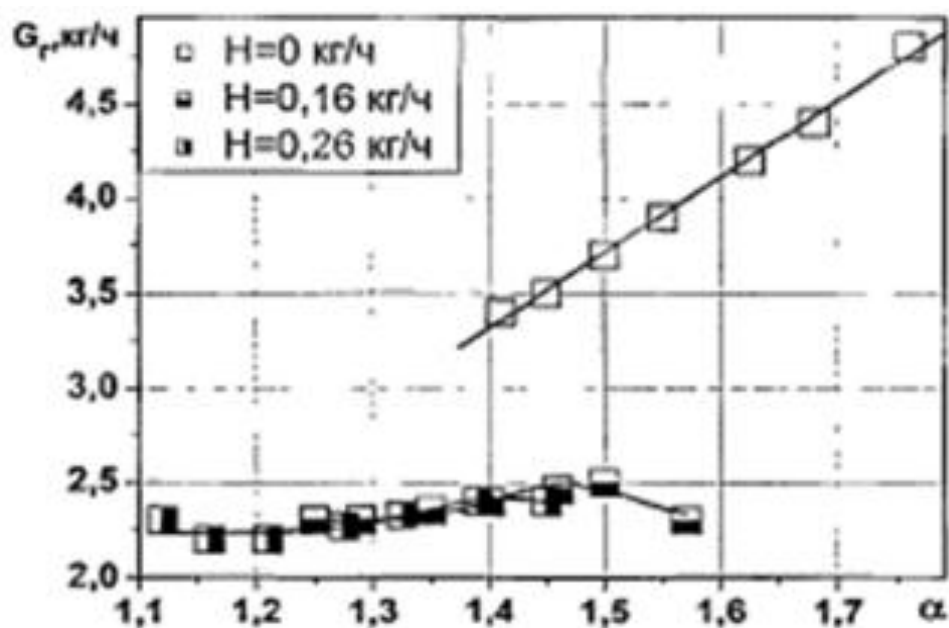


Рисунок 1.1 - Регулировочная характеристика по составу смеси
($n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 10 гр. п.к.в.).

На рисунке 1.1, сведения дают возможность дать оценку понижению итого выхода ОГ и расход воздуха. В частности, при $\alpha = 1,5$ и $\alpha = 1,4$ выбросы ОГ снижаются с 98 до 74 и с 84,5 до 71 кг/ч соответственно, что составляет 24,5 и 16% по массе. Расход воздуха при $\alpha = 1,5$ и $\alpha = 1,4$ снижается с 74 до 70 кг/ч, что составляет 3%.



Рисунке1.2 - Регулировочная характеристика по составу смеси
($n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 10 гр. п.к.в).

В рисунке 1.2 приведены графики перемены расположения дроссельной заслонки при добавках водорода. С сведений, показанных в графике, следует, то что присутствие наличия в ТВС водорода открытие дросселя снижается, то что способен спровоцировать присутствие крупных прикрытиях нерегулярное изменение частоты вращения коленчатого вала, определяющееся порогом ошутимости регулятора ХХ.

Вероятность внезапного улучшения характеристик процесса сгорания при применении водорода в качестве горючего либо его компонента (вместе с углеводородным бензином). Данная концепция никак не свежа, и образующиеся в данном пути задачи хорошо знакомы: основные проблемы (в особенности присутствие применении чистого водорода) объединены с дороговизной водорода, системой стабильной деятельность двигателя в отсутствии детонации и стуков, а кроме того сложностью хранения.

1.2.2 Обзор результатов, представленных в диссертации Павлова Дениса Александровича

В работе Павлова Дениса Александровича представлено, то что добавка незначительного доли водорода (примерно 5 % с массы топлива) дает возможность значительно увеличить пределы стабильного воспламенения и горения топливовоздушной смеси и повысить полноту сгорания топлива. Данное приводит к внушительному уменьшению числа токсичных выбросов с ОГ ДВС и улучшению его экономических характеристик.

Добавка водорода в ТВС значительно расширяет объем вероятного регулирования двигателя по составу смеси и УОЗ, в частности добавка водорода в количестве 5-10 % от массового расхода топлива дает обеспечение устойчивую работу двигателя в промежутке пуска и прогрева при коэффициенте избытка воздуха до 1,3 и УОЗ до 0 °п.к.в., то что дает возможность уменьшить выбросы СН и СО при уменьшении расхода топлива в среднем на 15-20 % и практическом сохранении уровня температуры ОГ;

- зависимость выбросов СН в период пуска и прогрева при добавке водорода от, α и УОЗ более пологая, причем с повышением расхода водорода данная тенденция увеличивается;

- минимальный выбросы СН в период пуска и прогрева обладают ролью при коэффициенте избытка воздуха примерно одинаковым $\alpha = 1$, УОЗ – 5 п.к.в. и расходе водорода - 7% от массового расхода топлива (0,04 кг/ч) при обеспечении стабильной работы двигателя.

В рисунке 1.3 представлены полученные результаты характерного перемены концентрации СН и С в режиме прогрева двигателя. Возможно наблюдать, то что при добавке водорода в ТВС и штатных значениях таблиц контроллера объемная концентрация СО и СН ряд увеличивается, то что разъясняется уменьшением коэффициента избытка воздуха за счет дополнительного обогащения рабочей смеси водородом.

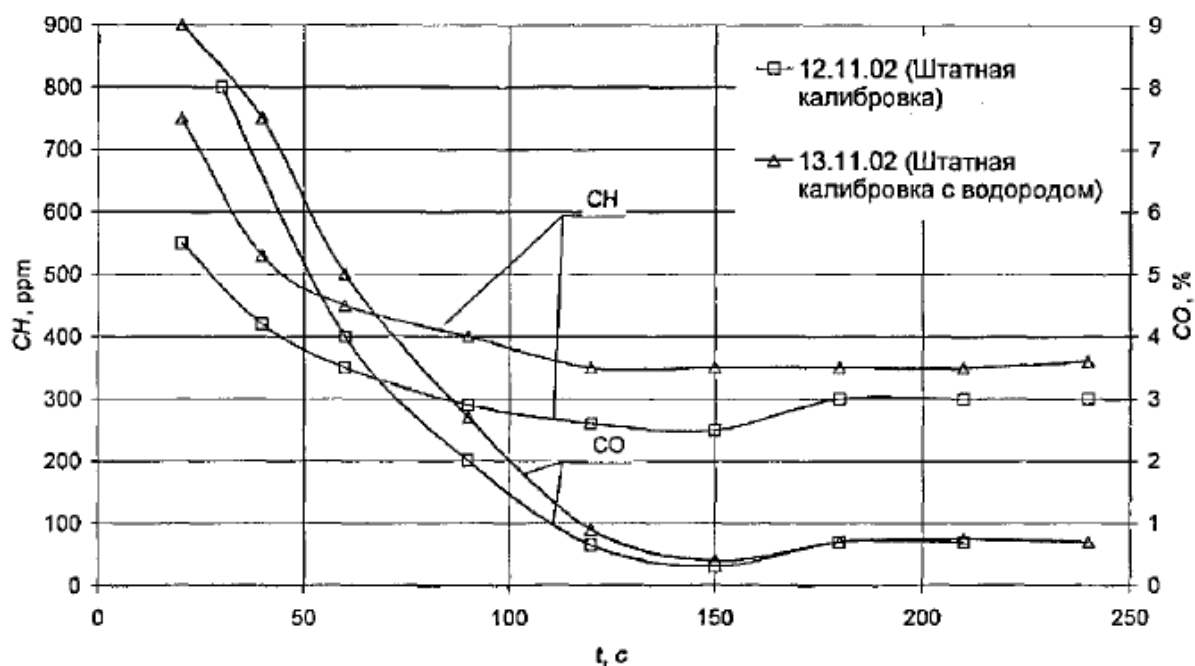
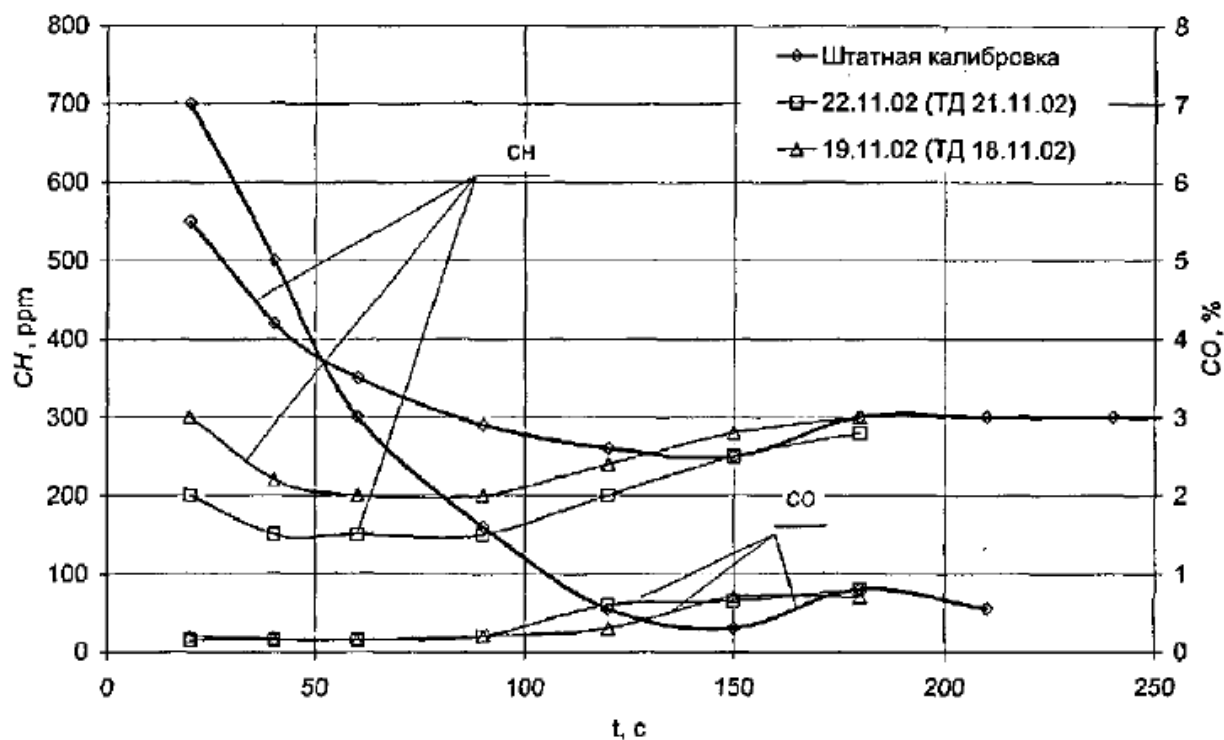


Рисунок 1.3 - Зависимость концентрации СН и СО при прогреве двигателя на режиме XX.

В рисунке 1.3 сведены результаты испытаний при добавках водорода с измененными, минимальным значениям СН и СО. Подчеркиваем, то что данные результаты получены в ходе изменяемых табличных величин в статических обстоятельствах и при движении автомобиля в режиме приближенного воспроизведения первых 2-3 минутки ездового цикла.



Рисунке 1.4 - Зависимость концентрации СН и СО при прогреве двигателя на режиме ХХ

Из рисунка 1.4, видно использование водорода при прогреве двигателя на режиме воспламенения, позволяет снизить объёмное содержание СН в 2 и более раза.

1.2.3 Обзор результатов, представленных в диссертации Галышева Юрия Виталиевича

В работе Галышева Юрия Витальевича представлена водород, действительно наиболее распространенный в нашей планете компонент, в свободном варианте он отсутствует. Главное (согласно числу) водородосодержащий элемент - вода. С целью отделения из нее водорода необходимо издержка энергии, превышающая в таком случае её число, что может являться приобретено при сжигании данного горючего в двигателе. Теплота сгорания водорода в расчете в единицу массы в три раза превосходит соответствующую значение с целью жидких топлив. Но теплота сгорания единицы объема стехиометрической смеси водородовоздушной смеси ниже, нежели для жидких и газообразных углеводородных топлив (см. табл. 1). Данное обозначает, то что при внешнем смесеобразовании и одинаковом КПД водородный двигатель предоставит наименьшую мощность, нежели бензиновый либо газовый. Разумеется, данное соответствие возможно существенно усовершенствовать, в случае если подавать водород в цилиндр под давлением после закрытия впускного клапана (соответствующие схемы представлены в области, предназначенном конструктивным схемам газовых двигателей). Данное подразумевает хранение водорода под давлением либо наличие компрессора. В конечном итоге, принцип о безопасности выхлопа водородного двигателя кроме того потребует определенной исправления. На самом деле, при сжигании водорода образовывается только лишь водяной пар.

В процессах парового риформинга природного газа 50 % водорода выходит с водяного пара, 50 % - с метана. В случае если начальным сырьем считается нефть, с воды выходит 64,5 % водорода, в случае если мазут - 69 %. Цена получаемого водорода менее в целом присутствие переработке газа, больше в целом - мазута. Безусловно, экономические оценки весьма условны, так как базируются в имеющихся соотношениях стоимости начальных продуктов. Согласно наиболее оптимистичным анализам стоимость водородного топлива в расчете в единицу энергии способен являться сравнима с подобным признаком с целью топлива. Но наиболее важно в таком случае, то что в процессах получения водорода тратится огромное число энергии, получаемой из-за результата доли теплоты сгорания исходных углеводородов. Очевидно, то что, в случае если приобретаемый водород служит с целью сжигания в тепловых двигателях, данные потери с энергетической точки зрения ничем никак не целесообразны. С целью изготовления водорода способен применяться кроме того уголь. Однако и в данном случае потери энергии больше, нежели присутствие получении коксового, светильного либо генераторного газа, какие согласно собственным моторным свойствам недостаточно уступают водороду. Помимо этого, при восстановлении водорода с воды с помощью угля высвобождаемый кислород окисляет углерод, то что приводит к образованию СОг - главного условия парникового эффекта.

Таблица 1 – Энергетические характеристики газов

	Теплота сгорания, МДж/кг	Теоретически необходимое количество воздуха, кг/кг	Теплота Сгорания стехиометрической смеси, МДж/м ³	Октановое Число
Метан	50,0	17,2	3,22	120
Пропан	46,3	15,6	3,35	115
Бутан	45,6	15,4	3,39	95

Оксид углерода	10,05	2,5	3,48	-
Водород	120,0	34	2,97	-

Характерные черты организации рабочего процесса в двигателях, работающих в этих либо других топливах, формируются, кроме теплоты сгорания, в первую очередь в целом подобными их особенностями, равно как границы воспламеняемости топливовоздушных смесей, склонность их к самовоспламенению, скорость распространения пламени. В данном плане водород значительно различается с классических жидких топлив. Во- первых, пределы его воспламеняемости существенно обширнее. Минимальная концентрация водорода в смеси с воздухом, основательно воспламеняемой с стороннего источника, является 4 % согласно объему. Водород владеет значительной детонационной стойкостью, характеризуемой химической устойчивостью его молекул. Достичь самовоспламенения водородовоздушной смеси никак не получилось в том числе и присутствие уровня сжатия 29 [176]. Данное, впрочем, никак не обозначает, то что в водородном двигателе с искровым зажиганием степень сжатия способен являться насколько угодно высокой. Ограничивает в этом случае никак не самовоспламенение топлива в несгоревшей доли объема камеры сгорания, а легкость его воспламенения. Наименьшая энергия воспламенения стехиометрической водородовоздушной смеси в 50 раз ниже, нежели у бензовоздушной при этих же обстоятельствах. Данное считается причиной преждевременного (калильного) зажигания смеси от нагретых элементов, обладающих в том числе и относительно невысокую температуру. Так как с повышением степени сжатия увеличивается средняя температура цикла, а, таким образом, и температура деталей, в таком случае непосредственно последняя считается сдерживающим условием. По этой причине в водородном двигателе допускаемая степень сжатия в существенно большей степени, нежели в бензинном, находится в зависимости с отличительных черт конструкции

двигателя, геометрии и использованных материалов элементов, системы охлаждения.

Работы по конвертированию двигателей в водородное топливо проводятся в 2-ух направленностях - формирование двигателей, работающих в "чистом" водороде и на бензине с добавкой водорода. В ближайшей возможности рационально применение бензиноводородных двигателей согласно обстоятельству недоступности водородной инфраструктуры, относительно значительной стоимости водорода и крупных массогабаритных характеристик систем хранения резервов водорода в борту автотранспортного средства.

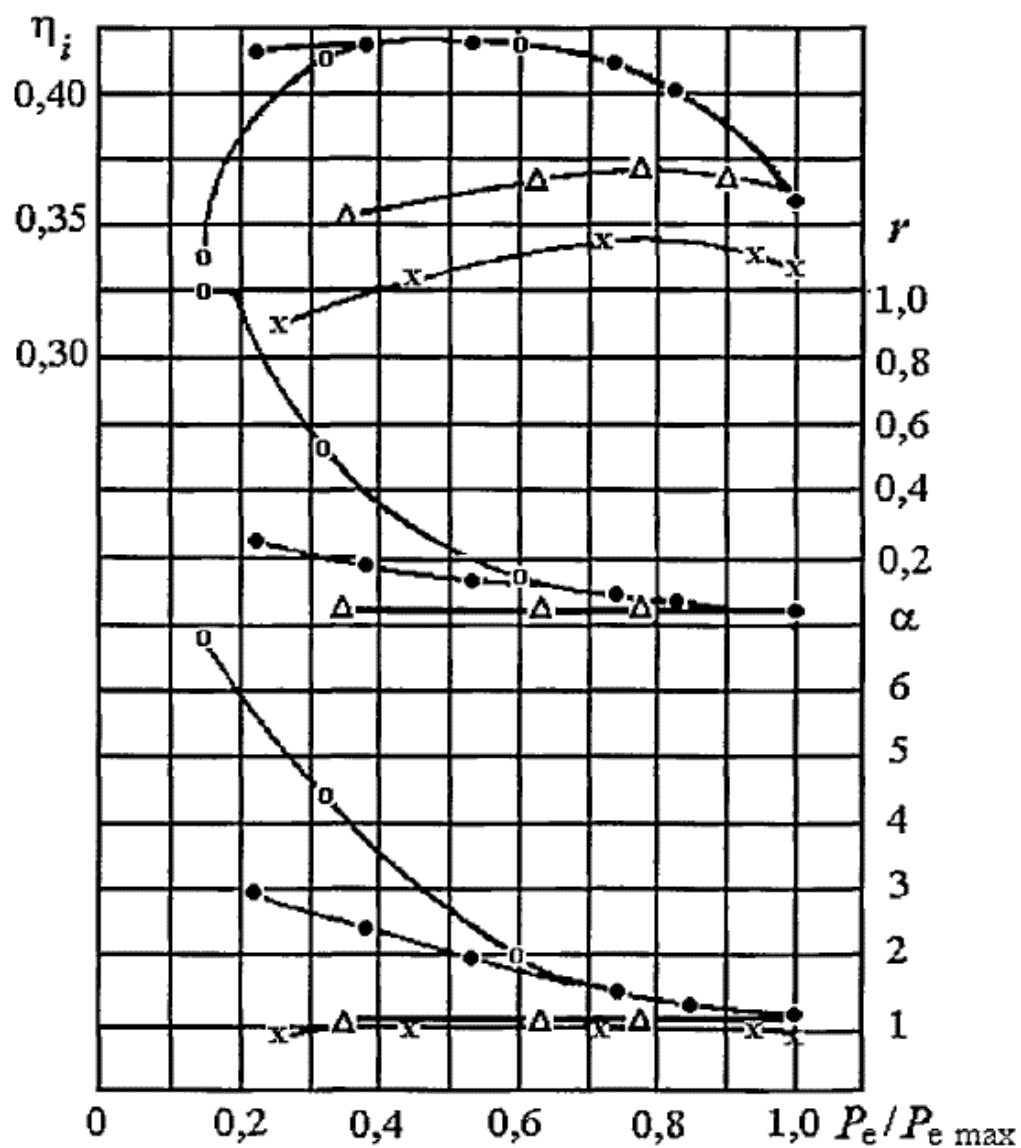


Рисунок 1.5- Нагрузочная характеристика двигателя ЗМЗ-24Д

($n=2500 \text{ мин}^{-1}$) при различных способах регулирования:

--х--х-- при работе на бензине;

при работе на бензине с добавкой водорода: --Δ--Δ-- количественное

регулирование; --о--о--качественное --•--•-- смешанное

Применение водорода в качестве вспомогательного топлива дает возможность, реализовать работу двигателя при частичных нагрузках в бедных топливовоздушных смесях, в следствии чего же существенно увеличивается экономность и уменьшается токсичность отработавших газов двигателя, более эффективным считается смешанное регулирование мощности двигателя.

1.2.4 Обзор результатов, представленных в диссертации Талда Геннадий Борисович

В работе Талда Геннадий Борисовича представлено, то что деятельность согласно конвертированию двигателей, в водородное топливо проводятся в 2-ух направленностях - создание двигателей, работающих в "чистом" водороде и на бензине с добавкой водорода. Целесообразно применение бензино-водородных двигателей согласно обстоятельству недоступности водородной инфраструктуры, относительно значительной цены водорода и крупных массогабаритных показателей систем хранения запасов водорода в борту транспортного средства. Применение водорода в свойстве вспомогательного горючего дает возможность, реализовать работу двигателя при частичных нагрузках в бедных топливовоздушных смесях, в следствии чего же существенно увеличивается экономность и уменьшается токсичность отработавших газов двигателя, более результативным считается смешанное регулирование мощности двигателя.

Вычисление реального цикла при отличиях добавках водорода к бензину выявил, то что главной фактором снижения индикаторного КПД двигателя при

повышении массовой доле водорода с 0,03 - 0,10 считается существенный увеличение относительных потерь тепла в диссоциацию продуктов сгорания.

Вычисленное исследование теоретического цикла двигателя выявило, то что система влияния добавки водорода к бензину на процесс сгорания выражается в повышении концентрации действующих элементов в области продуктов сгорания. Определено, то что КПД теоретического цикла почти никак не находится в зависимости с состава бензоводородных топливных композиций, однако существенно увеличивается с обеднением смеси.

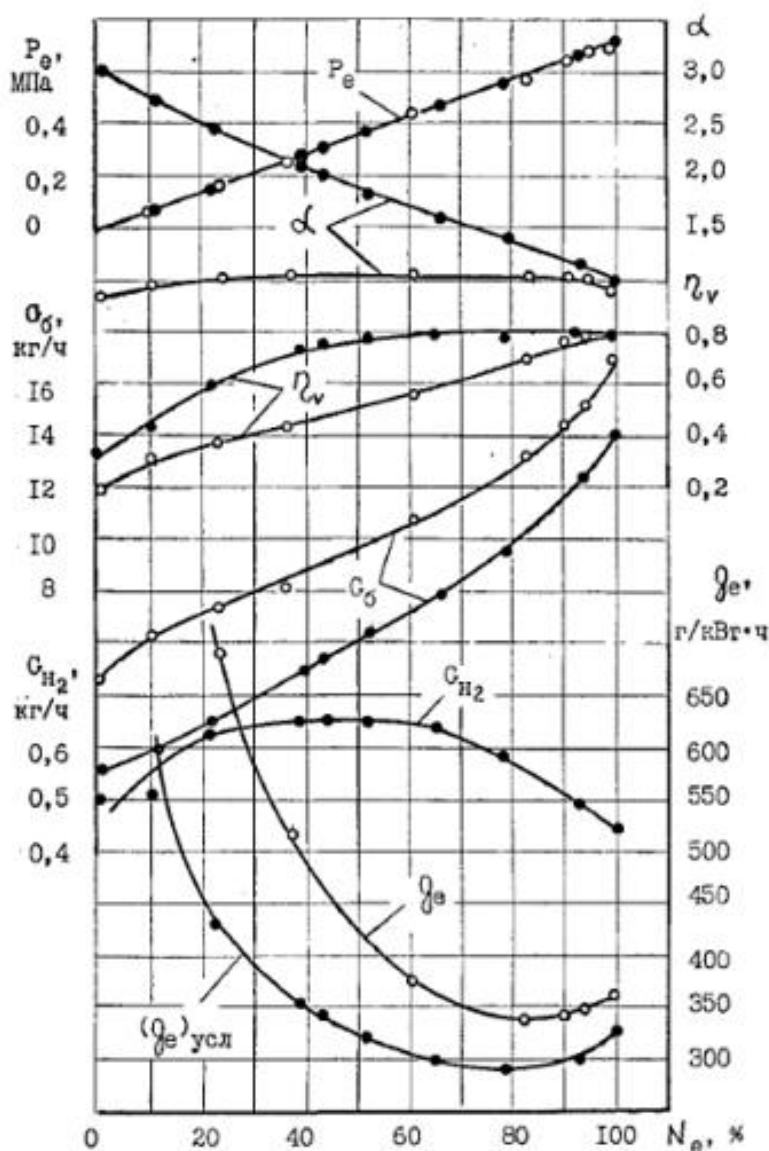


Рисунок 1.6- Нагрузочная характеристика двигателя ЗИЛ – 130

$n=1400 \text{ мин}^{-1}$; $\circ$ данные при работе на бензине;

• данные при работе на бензине с добавкой водорода.

В рисунок 1.6 возможно наблюдать, то что понижение расхода бензина согласно взаимоотношению, к работе в отсутствии водорода наиболее значительно в сфере, 20 и 40 кВт мощности, а при добавке водорода также в области, 20 и 40 кВт мощности, однако значимости равно как заметно из рисунка различаются при добавке водорода.

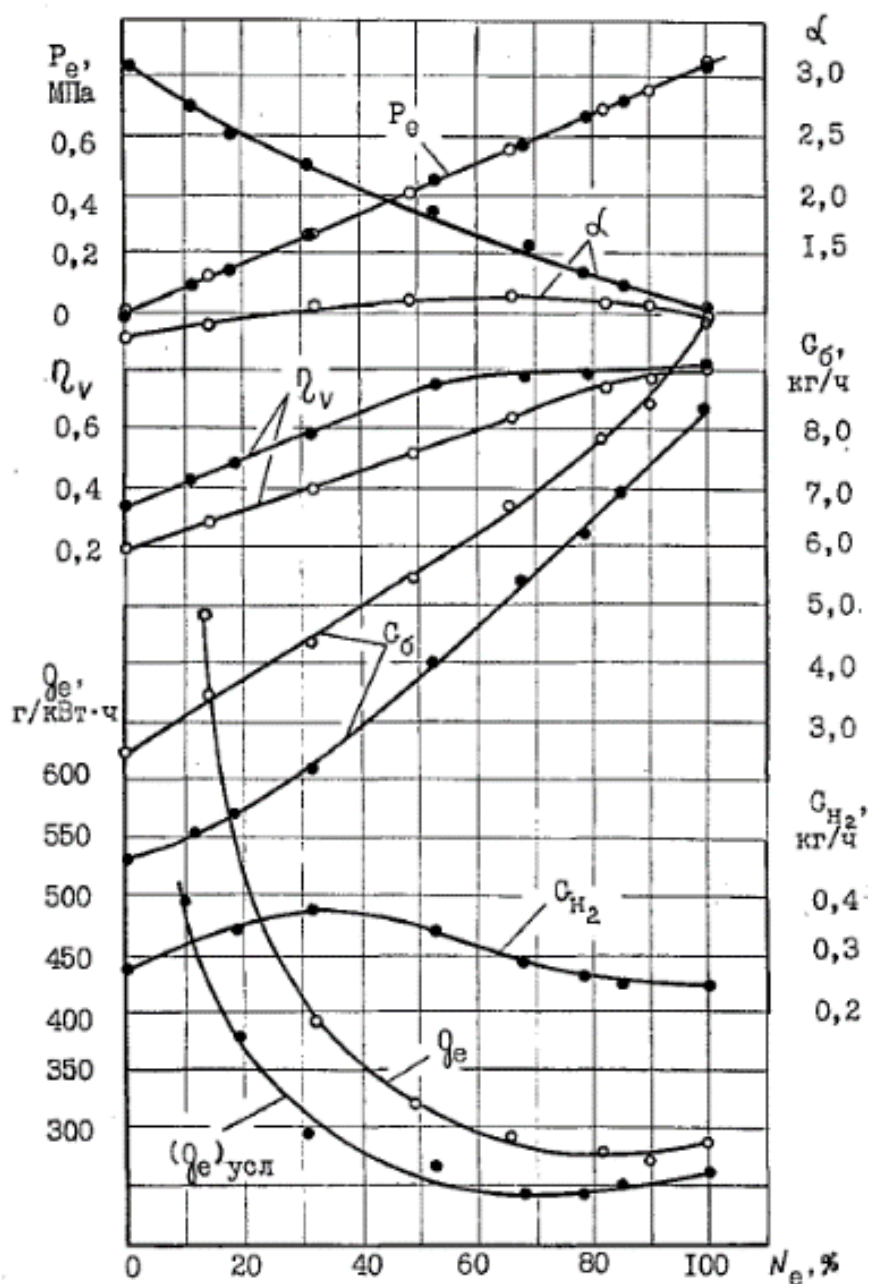


Рисунок 1.7- Нагрузочная характеристика двигателя ЗМЗ -24Д

$n = 1400 \text{ мин}^{-1}$; $\circ$ данные при работе на бензине;

• данные при работе на бензине с добавкой водород.

Из данных рисунок 1.7 можно видеть, что при добавках водорода происходит снижение расхода бензин и расход воздуха в области 20-40 кВт мощности при режиме $n = 1400$ об/мин.

1.2.5 Обзор результатов, представленных в диссертации Румянцева Виктора Валентиновича

В работе Румянцева Виктора Валентиновича представлено, то что при работе карбюраторного двигателя в бензовоздушной смеси коэффициент избытка воздуха как правило находится в диапазоне $\alpha = (0,8 - 1,2)$. Данное разъясняется узкими концентрационными границами воспламенения бензовоздушной смеси. Обеспечение высокой топливной экономичности карбюраторного двигателя допустимо в случае применения топлива с широкими концентрационными границами воспламенения. Подобным топливом считается водород.

Водород способен рассматриваться равно как вероятное топливо для автомобильных поршеньковых ДВС равно как в чистом варианте, таким образом и в варианте добавки к жидкому горючему. В сравнении с иными вероятными типами автомобильного топлива достоинства водорода считаются:

- высокая теплота сгорания - $1,2 \times 10^5$ кДж/кг,
- хорошая воспламеняемость водородовоздушной консистенции в широком диапазоне температур, то что гарантирует отличные отправные качества двигателя при различных температурах атмосферного воздуха;
- безвредность отработавших газов: абсолютная безопасность при применении в свойстве окислителя кислорода, и наименьшая при применении в качестве окислителя атмосферного воздуха;

- высокая антидетонационная устойчивость, допускающая работу при степени сжатия $\epsilon = 14$,
- высокая антидетонационная стойкость, допускающая работу при степени сжатия $\epsilon = 14$,
- высокая скорость сгорания; для стехиометрической водородовоздушной смеси она в 4 раза больше, чем для бензовоздушной, что обеспечивает лучшую полноту сгорания водорода и определяет более высокий термический КПД (на 20-25%),
- воспламеняемость в широком диапазоне смесей с воздухом, нижняя граница воспламеняемости является 4% содержания водорода в воздухе, верхняя – 75% стехиометрическая смесь содержит 30% водорода. Столь обширный диапазон воспламеняемости создает допустимым реализовать высококачественное регулирование мощности в ДВС посредством перемены количества подаваемого водорода взамен обыкновенного количественного регулирования (посредством перемены количества подаваемой смеси конкретного состава). При применении водорода возможно в существенной мере воздержаться с дросселированные потока воздуха в впуске и этим наиболее повысить экономичность двигателя в системах частичных нагрузок.

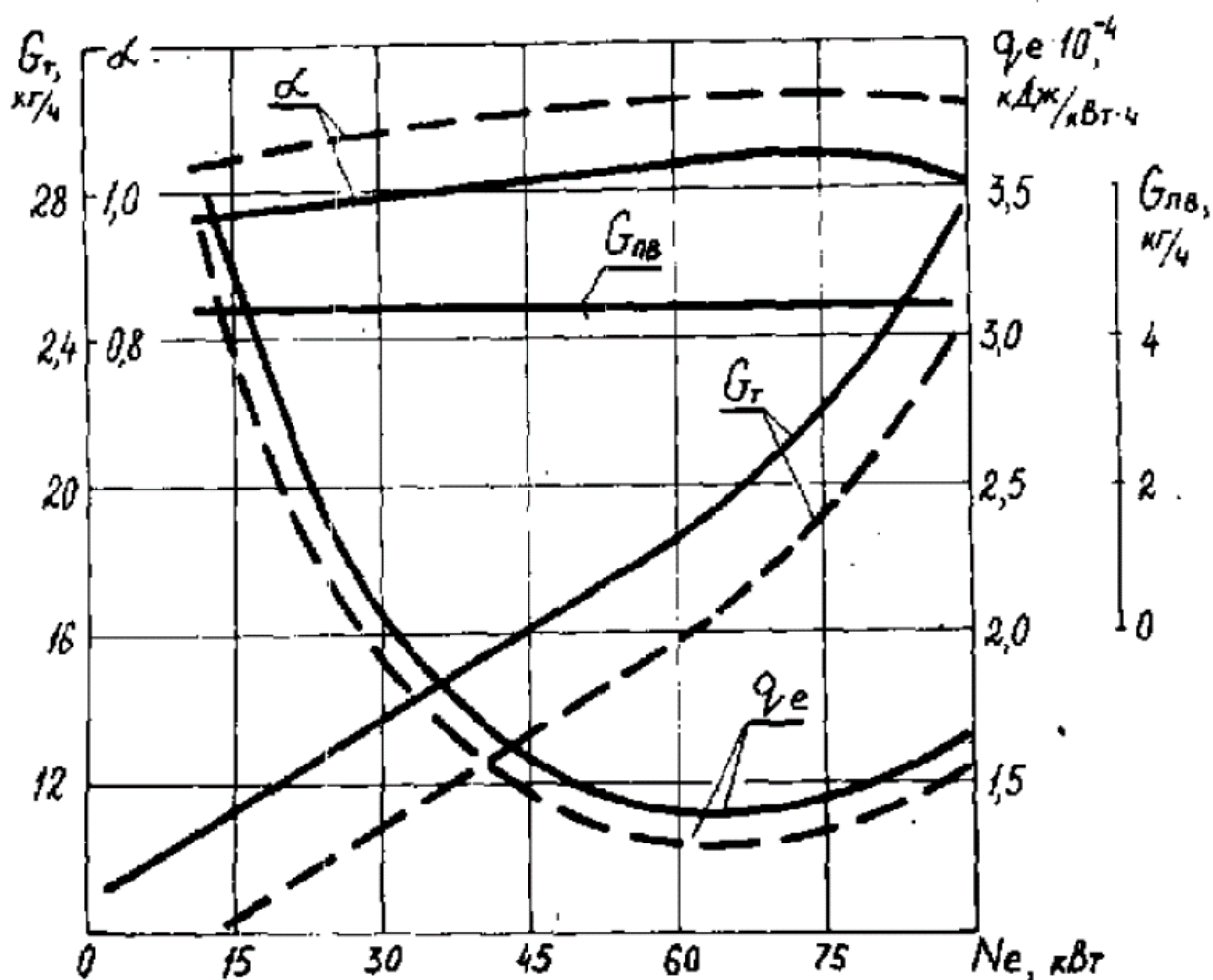


Рисунок 1.8. Нагрузочная характеристика двигателя ЗИЛ-130

($n = 2400 \text{ мин}^{-1}$) при работе на: -----бензине,

—————бензине с добавкой пароводорода ($K = 4,26$)

Все вышеуказанные достоинства имеют все шансы являться реализованы в ДВС при обстоятельстве определенных конструктивных переделок самого двигателя. Водород способен быть использован в свойстве горючего и в обычном автомобильном двигателе в отсутствии конструктивных его изменений, но при данном никак не станут выполнены все без исключения преимущества водорода, определяете его физико-химическими отличительными чертами; мощность двигателя способен понизиться из-за наименьшей плотности и наиболее невысокой теплоты сгорания стехиометрической водородовоздушной смеси ($3,65 \cdot 10^6$ кДж/м) в сравнении с бензовоздушной смесь ($3,98 \cdot 10^6$ кДж/м). Но данное понижение способен

являться компенсировано повышением КЦД из-за результата повышения степени сжатия и скорости сгорания.

В таком случае ведь период водород способен применяться в качестве иницирующей добавки к бедным бензовоздушным смесям с целью расширения границ их воспламенения и предоставления стабильности деятельности двигателя в данных смесях. Размер иницирующей добавки располагается в границах 4-5% согласно массе с расхода бензина. Добавка водорода в отмеченных долях к бензовоздушным смесям гарантирует повышение эффективности цикла, понижение расхода топлива в 25-30% [50], 5-10 процентная добавка водорода к главному топливу обеспечивает работу карбюраторного двигателя при $\alpha = 2$ [14]. При этом увеличивается экономичность работы двигателя. Согласно сведениям исследований [10], 5-процентная добавка водорода (согласно массе) к бензину дала возможность сбросить наибольшую мощность двигателя ГАЗ-24 при уменьшении расхода топлива в 30%. При абсолютном открытии дросселя и равной мощности удельный расход топлива при работе с 5-процентной добавкой водорода уменьшился в 11,5% (с 340 г/кВт ч вплоть до 297 г/кВт ч).

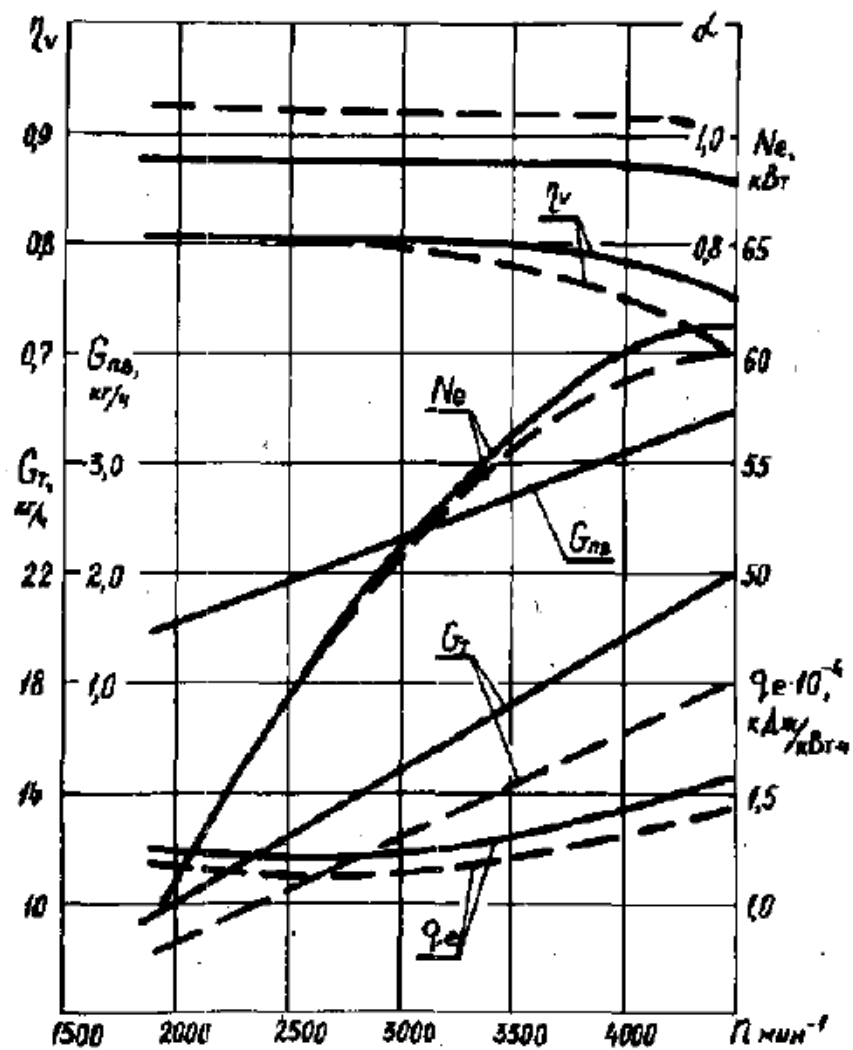


Рисунок 1.9— Внешняя скоростная характеристика двигателя 3МЗ - 24Д:

----- при работе на бензине,

———— при работе на бензине с добавкой пароводорода($K = 4,26$)

1.2.6 Обзор результатов,представленных в диссертации БортниковаЛионида Никитовича

В работе Бортникова Леонида Никитовича исследования показали, что:

- добавки водорода уменьшают зависимость рабочего процесса от УОЗ, в частности, при работе на режиме $n=2185$ об/мин, $P_e = 0,2$ изменение УОЗ от 20 до 50 градусов УПКВ практически не сказывается на мощностных и экономических показателях.

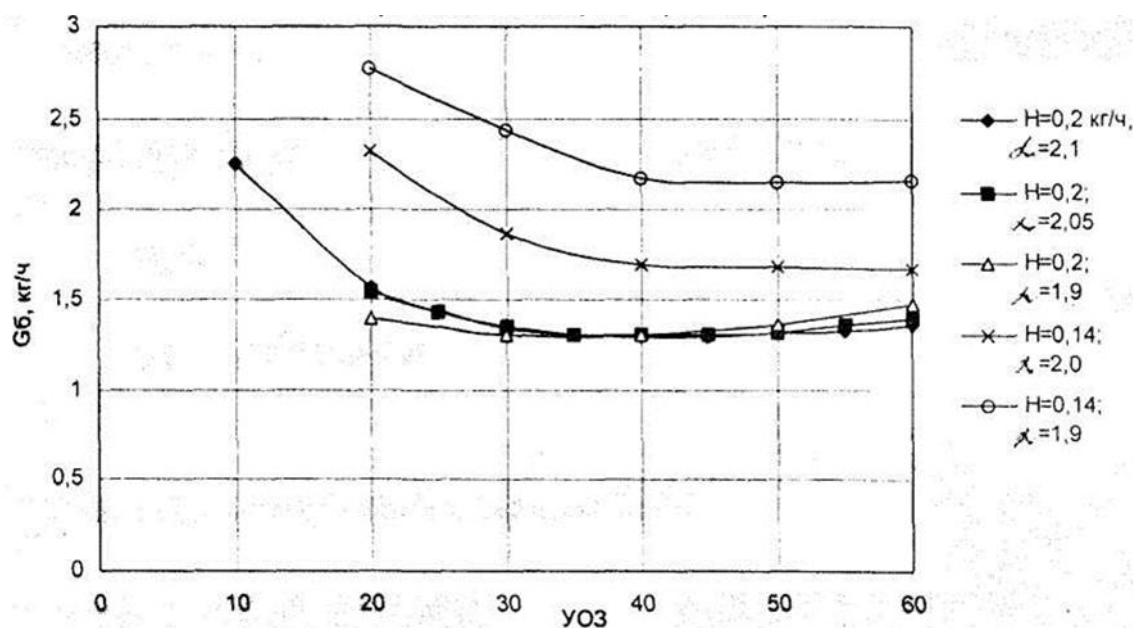


Рисунок 1.10–Регулировочная характеристика по УОЗ
($n = 2185$ об/мин, $P_e = 0,2$ МПа)

На рисунок 1.10 можно видеть, что в диапазоне УОЗ от 20 до 50 град, изменение расхода бензина при $\alpha = 2$ и $G_o=0,2$ кг/ч практически отсутствует, что означает важный для практики факт - малую зависимость параметров двигателя при подаче водорода в ТВС от величины УОЗ.

- за счёт расширения пределов устойчивого горения ТВС с добавками водорода обеспечивалась устойчивая работа двигателя на исследованных режимах при коэффициенте избытка воздуха равном $\alpha = 2,2 - 2,4$; при этом относительное количество водорода составляло для режима холостого хода при $n=850$ об/мин 30% от расхода бензина, для режима $n=2185$ об/мин и $P_e=0,2$ МПа - 50%.

- расход бензина при подводе водорода и работе в диапазоне бедных смесей существенно снижается, причём механизм действия добавок водорода различен и зависит от совершенства рабочего процесса. В частности, при работе на холостом ходу и малых добавках водорода происходит значительное снижение расхода бензина за счёт активизации процесса горения, тогда как дальнейшее снижение расхода бензина связано с замещением его водородом как горючего. При работе двигателя на ХХ при большем числе

оборотов и на нагрузочных режимах процесс активизации горения существенно слабее;

- добавки водорода приводят к существенному изменению состава ОГ, в частности, при коэффициенте избытка воздуха более $\alpha = 1,1 - 1,2$ содержание СО снижается до уровня следов, СН - с средним на 20-40 %;
- при подводе водорода повышается цикловая равномерность рабочего процесса, например, на режиме XX при оценке среднеквадратичным отклонением максимального значения индикаторного давления в 2 раза;

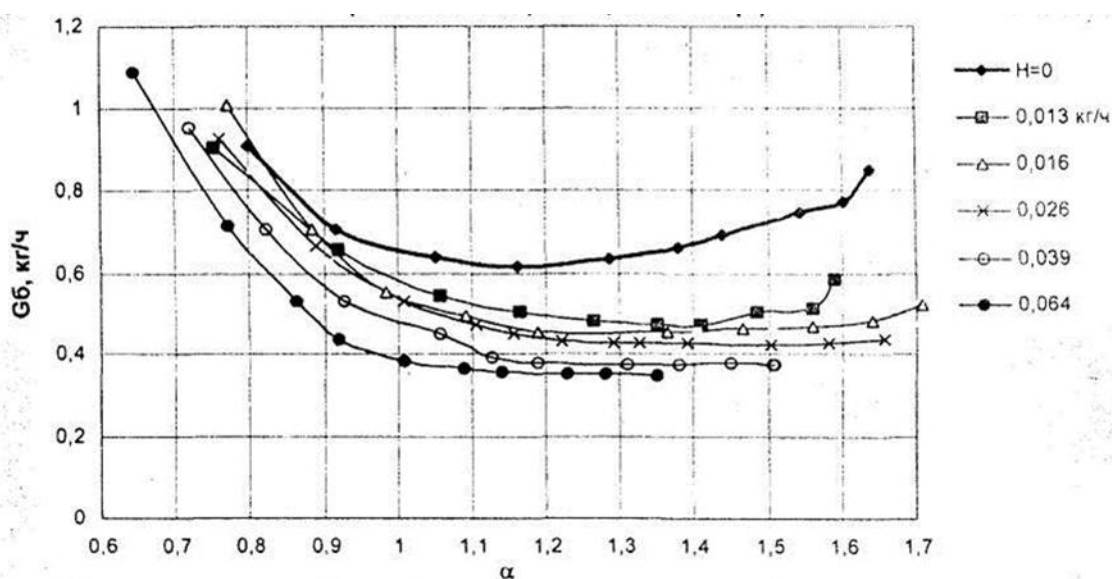


Рисунок 1.11 – Регулировочная характеристика по составу смеси
($n = 850$ об/мин, $Pe = 0$, $УОЗ = 16$ гр.)

На рисунок 1.11 можно также видеть, что снижение расхода бензина по отношению к работе без водорода более существенно в области $\alpha > 1$ и увеличивается с ростом α . Кроме того, обращает внимание резкое снижение расхода бензина при малых дозах подачи водорода, в частности, абсолютная величина уменьшения G_b , например, при $\alpha = 1,2$ одинакова при подаче водорода в количестве до 0,013 кг/ч и от 0,013 до 0,064 кг/ч (рис.2.6), т.е равное уменьшение G_b получается при увеличении расхода водорода в 5 раз (0,064/0,013).

Проведенные исследования влияния на рабочий процесс добавок водорода при РОГ показали, что на выбранном режиме работы двигателя ($P_e=0,2$ МПа, $n=2185$ об/мин) может быть получено соотношение водород -количество рециркулируемых газов, при котором расход бензина снижается, в частности, на 7% по сравнению с исходным уровнем (РОГ=0). При этом повышение степени рециркуляции требует увеличения расхода водорода. Однако в этом случае отмечается повышение концентрации СН.

Добавки водорода «под свечу», по применённому при проведении работы способу не выявили дополнительного эффекта по расходу бензина и составу ОГ, количественное выражение которых практически соответствует способу подвода водорода во впускную трубу.

Полученные результаты могут использоваться при практическом осуществлении способа добавок водорода в ДВС, а также при разработке расчётной методики оценки потребного количества водорода при достижении заданного эффекта.

Вывод по главе 1

В 1 главе данной работы приведены результаты, показывающие положительное влияние добавки водорода на снижение массового расхода топлива, при увеличении КПД цикла. Также многими авторами показано значительное влияние добавки водорода на снижении токсичности в большей степени по продуктам неполного сгорания, что показывает увеличение полноты сгорания и эффективности теплоиспользования. В тоже время отмечено, что возможности получения водорода его хранения и транспортировки оказывают негативное влияние на его коммерческую эффективность, что значительно удорожает в России его стоимость и ставит под сомнение возможности массового применения.

Глава 2 Анализ эффективности добавки водорода

На рисунке 2.1 представлены Регулировочные характеристики при увеличении доли водорода в смеси ($n = 1170 \text{ мин}^{-1}$; $P_e = 0$; УОЗ = опт.).

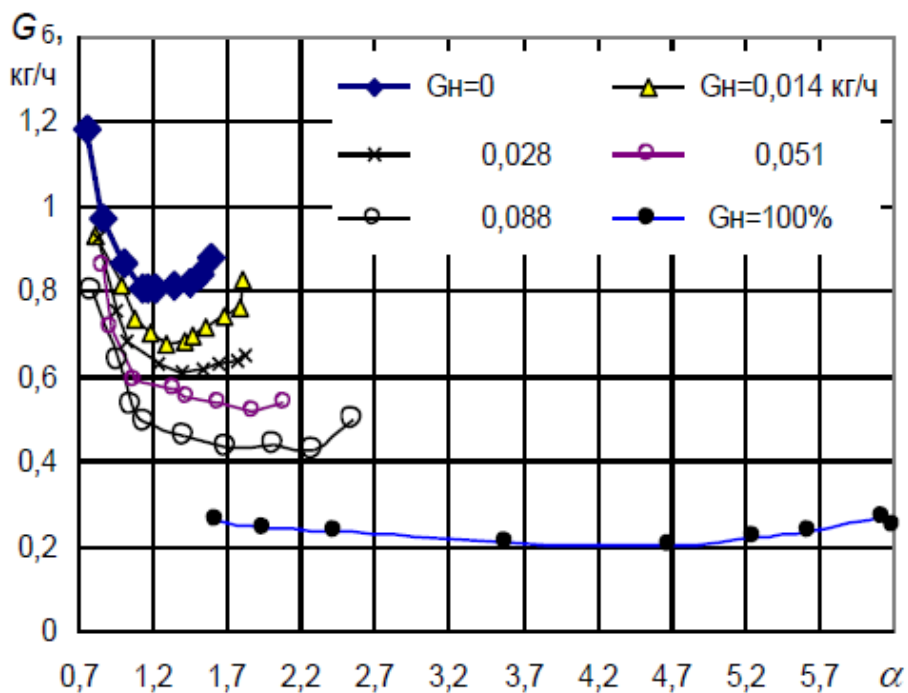


Рисунок 2.1 – Регулировочные характеристики при увеличении доли водорода в смеси ($n = 1170 \text{ мин}^{-1}$; $P_e = 0$; УОЗ = опт.)

Из рисунка видно, расход бензина G_B при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,2$ (УОЗ = опт.) при добавке водорода $H_2 = 0,014 \text{ кг/ч}$ составляет $G_B = 0,7$ при добавке водорода $H_2 = 0,88 \text{ кг/ч}$ расход бензина составляет $G_B = 0,5$, это означает что при каждой доли добавки водорода, расход бензина уменьшается на 3-6 %.

Таблица 2.1 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении состава смеси

$G_H,$ кг/ч	$\alpha = 1,2$	
	G_6 , кг/ч	Стоимость
0	0,8	12,5
0,014	0,7	13,4
0,028	0,64	14,9
0,051	0,59	18,2
0,088	0,5	23,3
100%	-	-

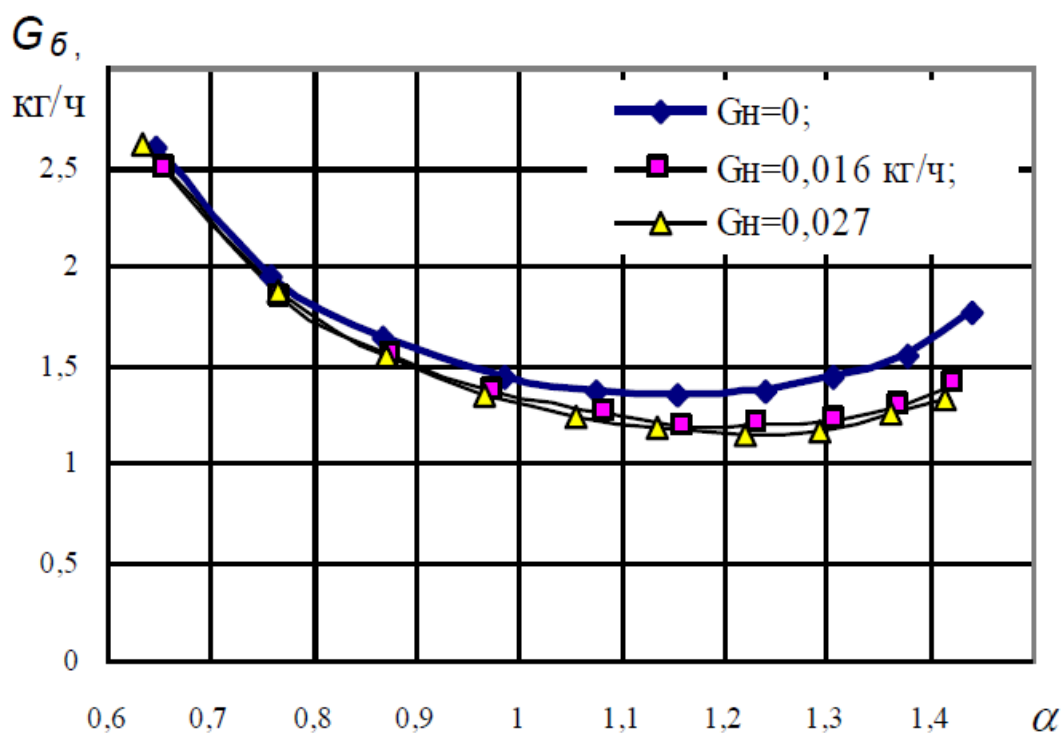


Рисунок 2.2 – Регулировочные характеристики при увеличении доли водорода в смеси ($n=2000$ мин-1; $Pe=0$; УОЗ=опт.)

На рисунке 2.2 показано при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ расход бензина G_B при добавке водорода $H_2=0,016$ кг/ч составляет $G_B= 1,4$ кг/ч, при $\alpha =$

1,2 при том же добавки водорода расход бензина составляет $G_B = 1,35$ кг/ч, это объясняется увеличением доли добавки водорода, уменьшается расход воздуха.

Таблица 2.2 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении состава смеси

G_H , кг/ч	G_b , кг/ч		Стоимость	
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$
0	1,4	1,35	21,99343	21,20795
0,016	1,33	1,22	23,71562	21,98757
0,027	1,3	1,2	25,18437	23,61341

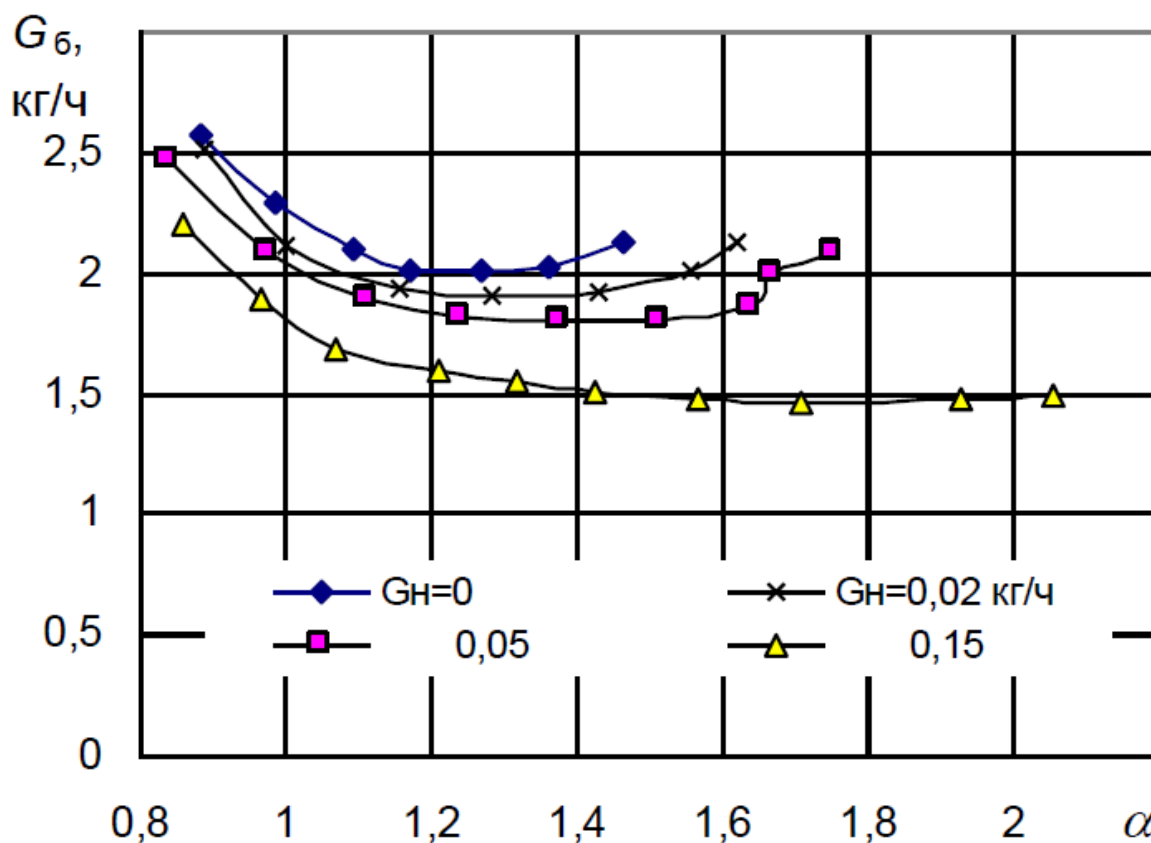


Рисунок 2.3 – Регулировочные характеристики при увеличении в смеси доли водорода ($n=2000$ мин⁻¹; $P_e=0,2$ МПа; $\gamma_{O_2} = \text{опт.}$)

Из рисунка 2.3 можно видеть, что расход бензина G_{δ} уменьшается при больше коэффициенте избытке воздуха ($\gamma_{O_2} = \text{опт.}$), при работе двигателя при режиме $n=2000$ об/мин. Из таблицы 2.3 видно при $\alpha = 1$ расход бензина при добавке водорода $H_2=0,02$ кг/ч составлять $G_{\delta}= 2.2$ кг/ч.

Таблица 2.3 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении составу смеси

G_H , кг/ч	G_{δ} , кг/ч		Стоимость	
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$
0	2,3	2	36,1	31,4
0,02	2,2	1,9	38,0	33,3
0,05	2,1	1,85	41,8	37,8
0,15	1,8	1,6	54,7	51,5

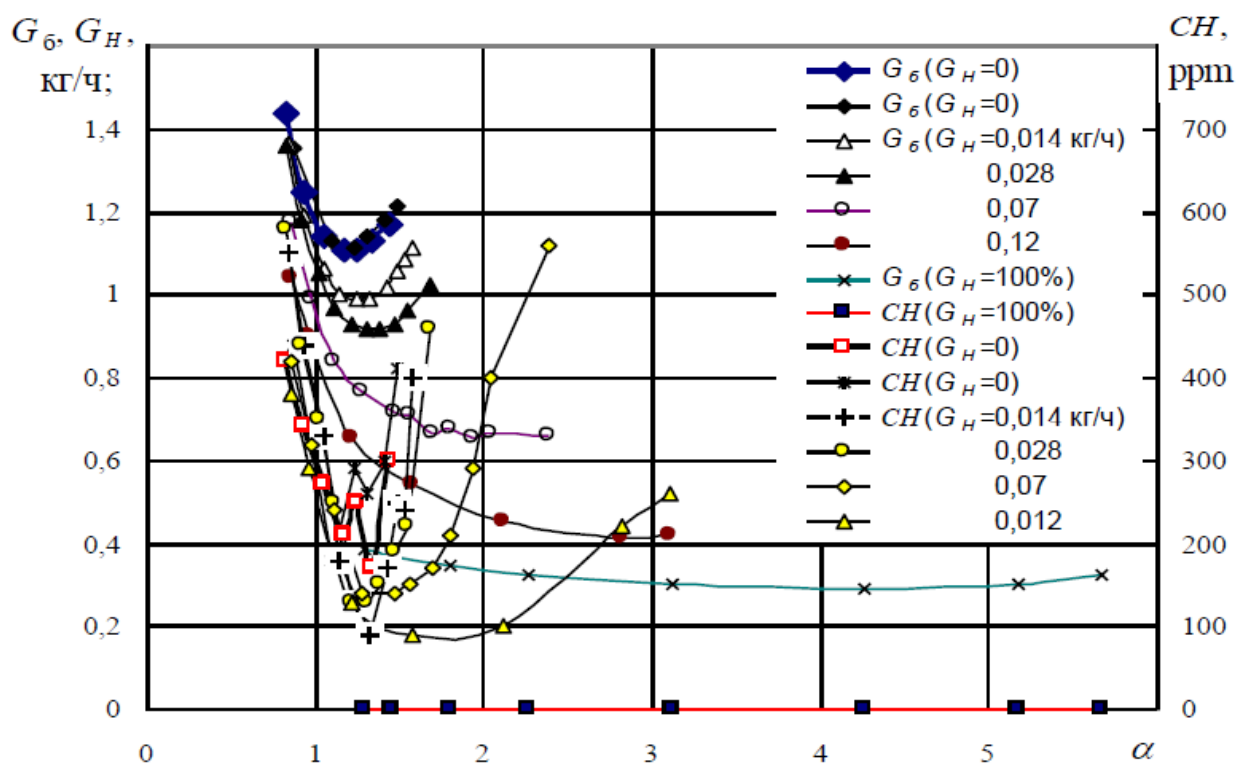


Рисунок 2.4 – Регулировочная характеристика ($n=1650$ мин-1, $Pe=0$)

На рисунке 2.4 приведены расход бензина G_B с добавки водорода G_H , по коэффициенту избытка воздуха α . При работе двигателя на режиме $n = 1650$ об/мин. Из таблицы можно видит, что при $\alpha = 1$ при добавке водорода $H_2 = 0.014 - 0,12$ кг/ч расход бензина значительно снижается с 1,19 до 0,83 кг/ч, то есть на 26%.

Таблица 2.4 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении составу смеси

$G_{\delta}, G_H,$ кг/ч	$\alpha = 1$	
	$G_{\delta},$ кг/ч	Стоимость
0 (—◆—)	1,19	18,69441
0 (—◆—)	1,20	18,85151

0,014 (—△—)	1,10	19,74968
0,028 (—▲—)	1,06	21,59044
0,07 (—○—)	0,98	27,74108
0,12 (—●—)	0,83	34,20298

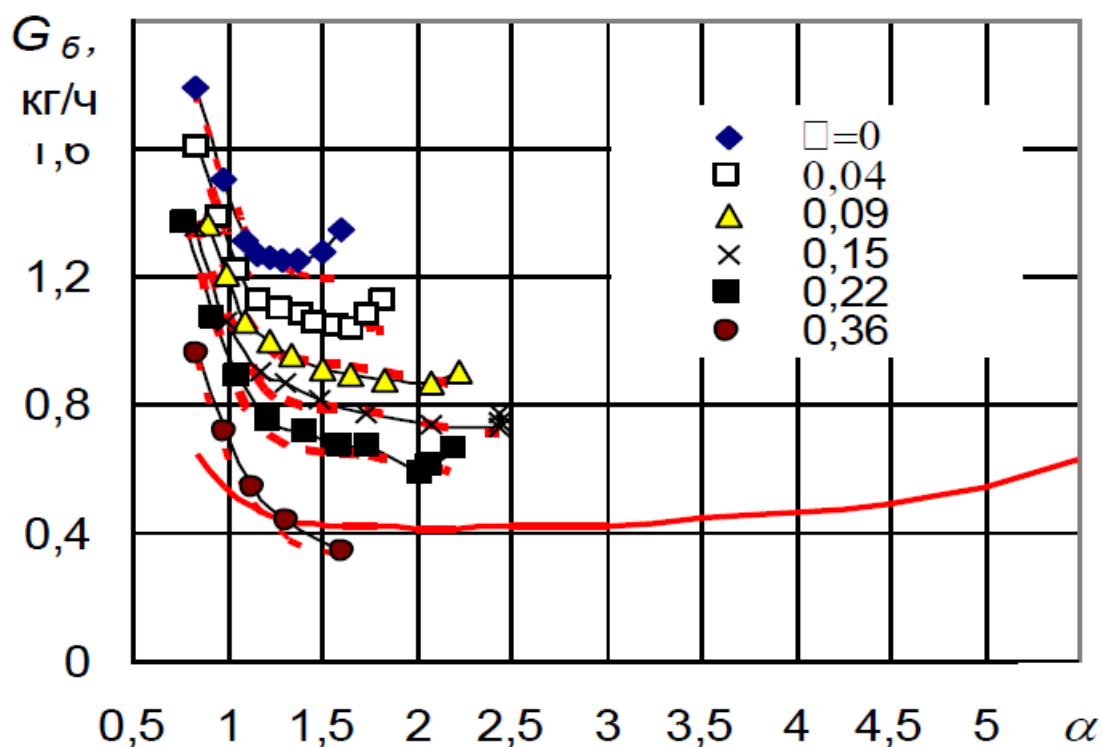


Рисунок 2.5 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных
($n=1170$ мин-1; $P_e=0,18$ МПа)

На рисунке 2.5 приведено расход бензина G_B по коэффициенту избытка воздуха α , при режиме $n = 1170$ об/мин. Из таблицы можно увидит при $\alpha = 1$ при добавке водорода $H_2= 0,04 - 0,22$ кг/ч расход бензина снижается с 1,35 до 0,95 кг/ч. При $\alpha = 1,5$ при добавке водорода $H_2= 0,04 - 0,22$ кг/ч расход бензина снижается с 1,05 до 0,80 кг/ч на 30% меньше.

Таблица 2.5 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении состава смеси

G_H , кг/ч	G_{δ} , кг/ч		Стоимость	
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,5$
0	1,45	1,30	22,77	20,42
0,04	1,35	1,05	28,26	23,54
0,09	1,20	0,90	34,72	30,01
0,15	1,05	0,80	42,95	39,02
0,22	0,95	0,65	53,72	49,01
0,36	0,70	0,35	74,48	68,99

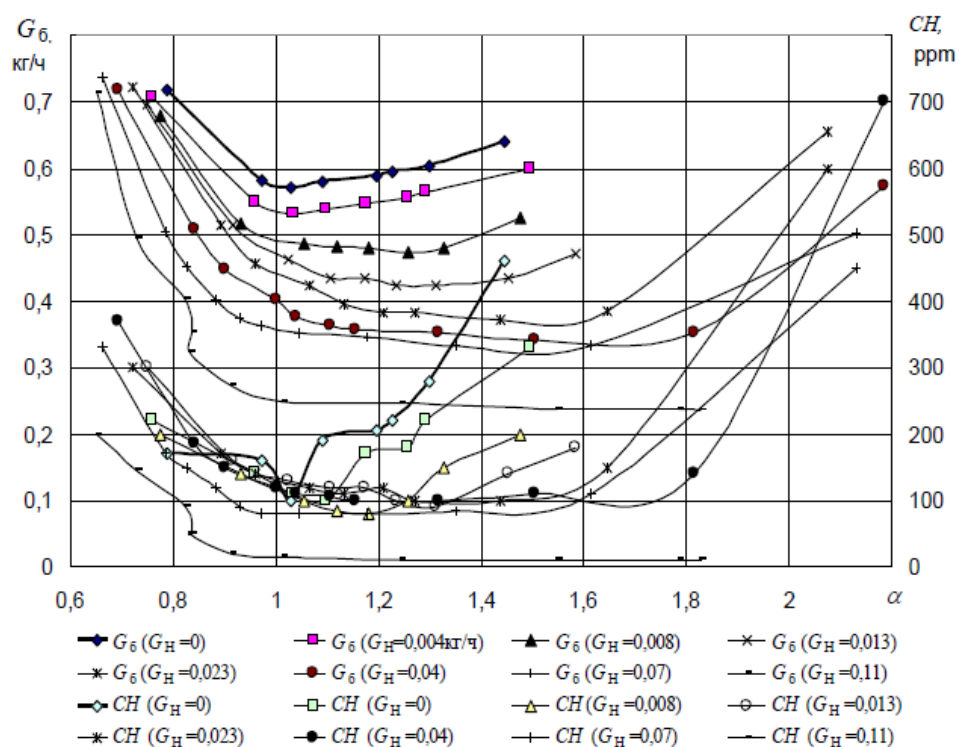


Рисунок 2.6– Регулировочная характеристика
($n=850$ мин-1; $Pe=0$; УОЗ = опт)

На рисунке 2.8 мы усматриваем расход бензина G_B по коэффициенту избытку воздуха ($\gamma_{O_2} = \text{опт}$). Так, при $\alpha = 1.2$ при добавке водорода $H_2 = 0.004 - 0.11$ кг/ч, расход воздуха уменьшается с 0,59 – 0,25 кг/ч на 55%. Это можно объяснить с увеличением водорода происходит значительное снижения расхода топлива.

Таблица 2.6 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении нагрузки

$G_H, \text{кг/ч}$	$G_{\phi}, \text{кг/ч}$		Стоимость	
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$
0	0,57	0,59	8,95	9,268
0,004	0,54	0,55	9,18	9,34
0,008	0,49	0,48	9,10	8,95
0,013	0,48	0,44	9,83	9,20
0,023	0,45	0,39	11,12	10,18
0,04	0,40	0,36	13,33	12,71
0,07	0,36	0,35	18,00	17,84
0,11	0,25	0,25	23,32	23,32

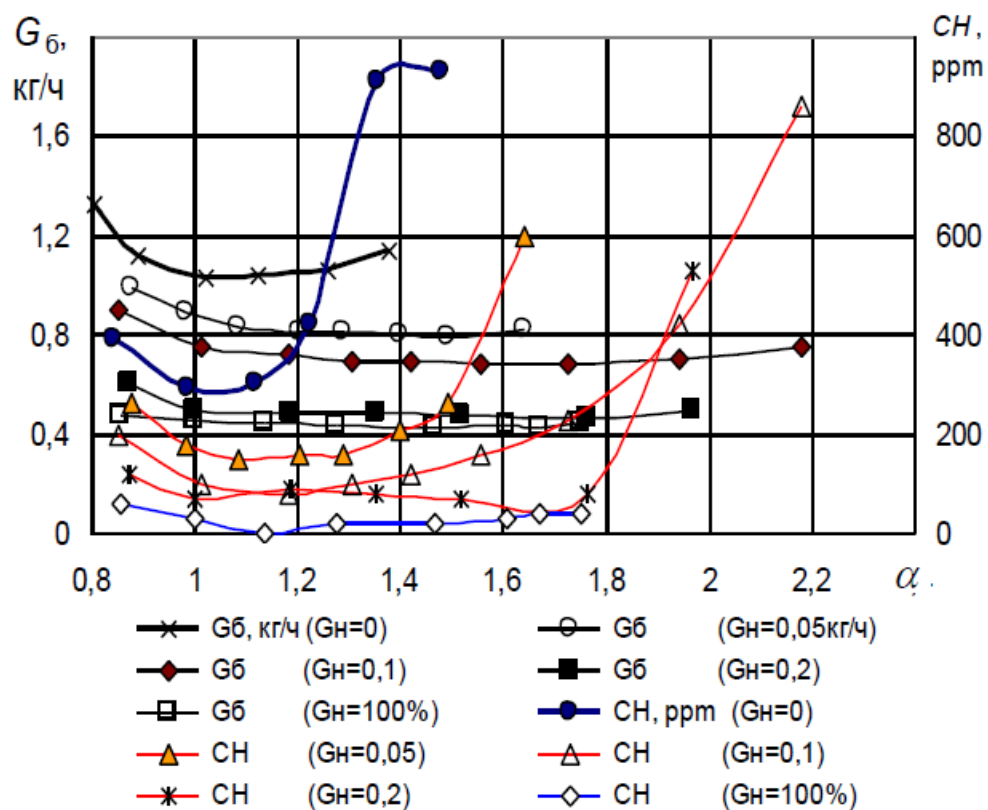


Рисунок 2.7 – Регулировочные характеристики по составу смеси
($n = 1380$ мин-1; $Pe = 0,04$ МПа; УОЗ = опт.)

Из рисунка 2.9 видно при добавке водорода $H_2 = 0,02 - 0,15$ кг/ч при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ (УОЗ = опт), расход бензина G_{Bc} 0,80 снизился до 0,70 кг/ч на 10%. При режиме $n = 1380$ об/мин.

Таблица 2.7 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении состава смеси

G_H , кг/ч	G_b , кг/ч		Стоимость	
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$
0	1,05	1,07	16,49	16,80

0,02	0,85	0,80	16,88	16,09
0,05	0,75	0,70	20,60	19,81
0,15	0,60	0,70	35,88	37,45
100%	0,50	0,50	184,22	184,22

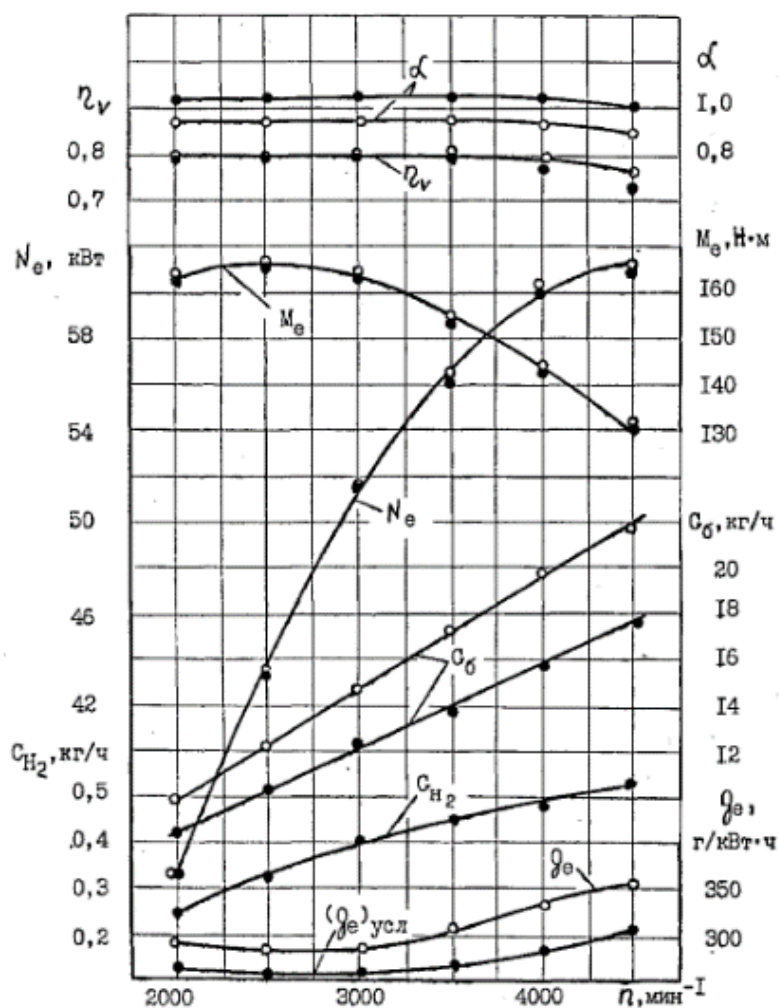


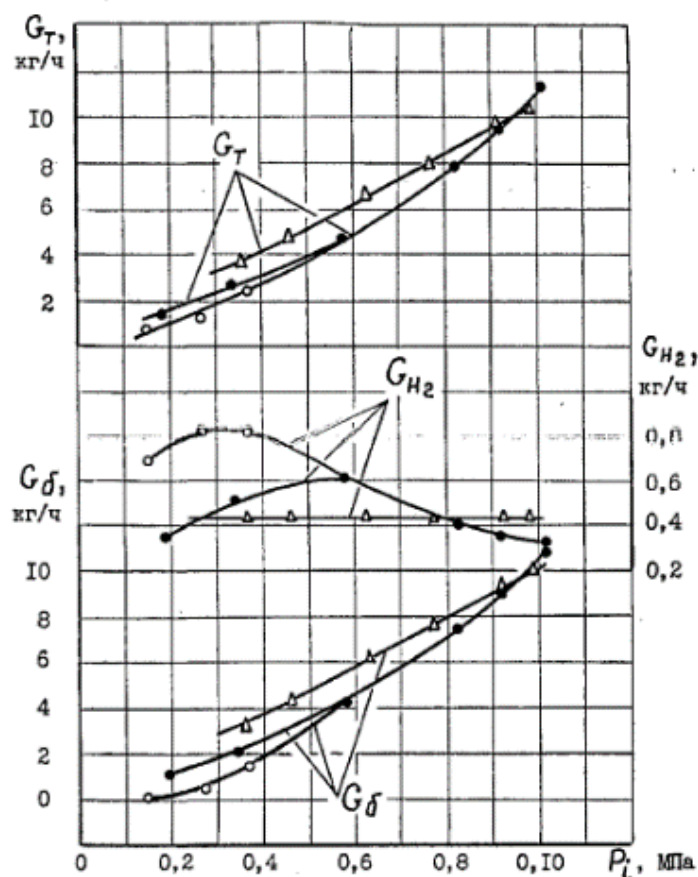
Рисунок 2.8—Внешняя скоростная характеристика двигателя Э43-24Д

На рисунке 2.8 показано, что мощность двигателя по всей скоростной характеристике фактически одинакова в обоих случаях. Тем не менее экономичность двигателя при добавке водорода, повысилась на 10-14%. При работе на бензине на режиме $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, удельный эффективный расход топлива составил 279 г/кВт·ч, а при добавке водорода, условный удельный

расход бензина составил 258 г/кВт·ч, что же является повышение экономичности на 8%. На режиме $n = 4500 \text{ мин}^{-1}$ повышение экономичности составило 12%, что объясняет более эффективным, чем при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, при добавке водорода на этом режиме.

Таблица 2.8 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении нагрузки

$n, \text{ мин}^{-1}$	$N_e, \text{ МПа}$		$Gt_{\phi}, \text{ кг/ч}$		$Gt_{H_2}, \text{ кг/ч}$	Стоимость
2000	34,4	34,4	10	8,5	0,25	1656,21
2500	43,8	43,9	12,2	10,5	0,32	2043,50
3000	51,8	51,9	15	12,5	0,4	2440,22
3500	56	56,5	17,6	14	0,45	2745,62
4000	60	60,5	19,8	15,9	0,48	3115,28
4500	61	61,5	21,8	17,8	0,54	3481,79



Двигатель 3МЗ-24Д; $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$

- - качественное регулирование мощности;
- ▲ - количественное -----● - смешанное -----

Рисунок 2.9. – Часовой расход топлива по нагрузочной характеристике при различных способах регулирования мощности

На рисунке 2.9 можно видеть с уменьшением нагрузки вызвало увеличением подачи водорода. При смешанной регулировании уменьшение нагрузки до 50% от максимальной обеспечивали уменьшенном коэффициента избытка воздуха без дросселированные на впуске.

Таблица 2.9 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении нагрузки

P_i , МПа	G_T , кг/ч	G_{H_2} , кг/ч	G_{δ} , кг/ч	Стоимость

0,2	1	-	1,8	0,78	0,38	0,42	0,5	1	-	145,42
0,4	2,8	4	2,4	0,8	0,54	0,42	2	2,8	4	172,51
0,6	4,9	6	4,9	0,6	0,6	0,42	4,8	4,8	6	181,22
0,8	7,8	8,2	7,8	0,42	0,42	0,42	7,4	7,4	8	190,32
0,10	11	10,8	11	0,34	0,34	0,42	10,8	10,8	10	229,62

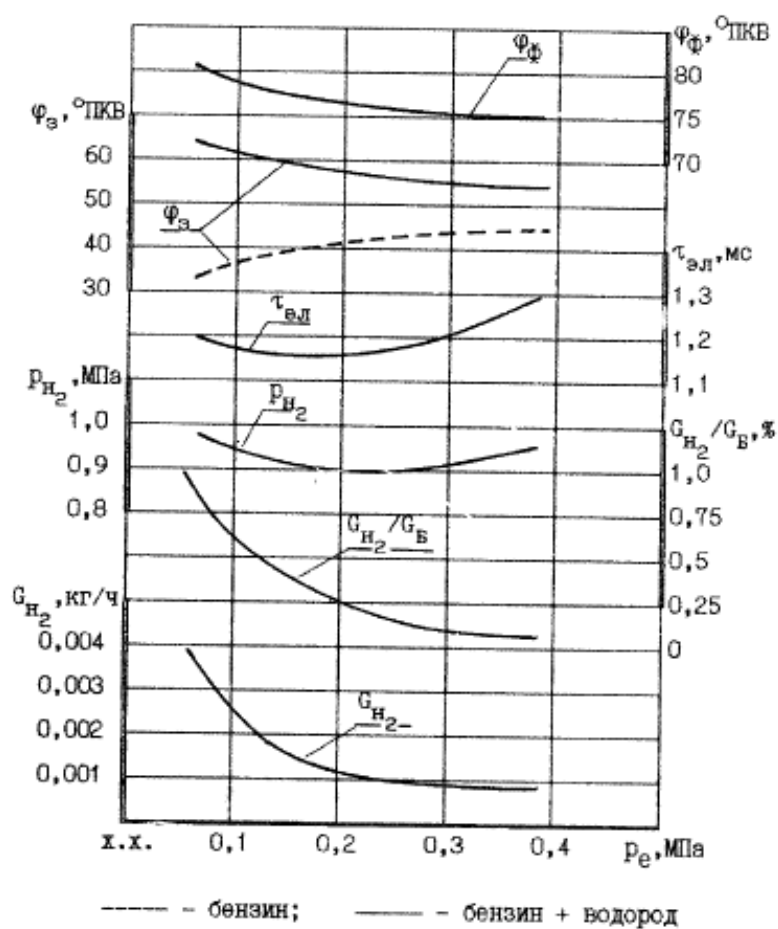


Рисунок 2.10. – Нагрузочная характеристика оптимального регулирования

На рисунке 2.10 можно видеть при работе с добавки водорода обеспечивается возможность эффективного развития начального очага пламени.

Таблица 2.10 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении нагрузки

P_e , МПа	0,1	0,2	0,3	0,4
G_{H_2} / G_b , кг/ч	0,65	0,25	0,15	-
G_{H_2} , кг/ч	0,0026	0,0012	0,001	-

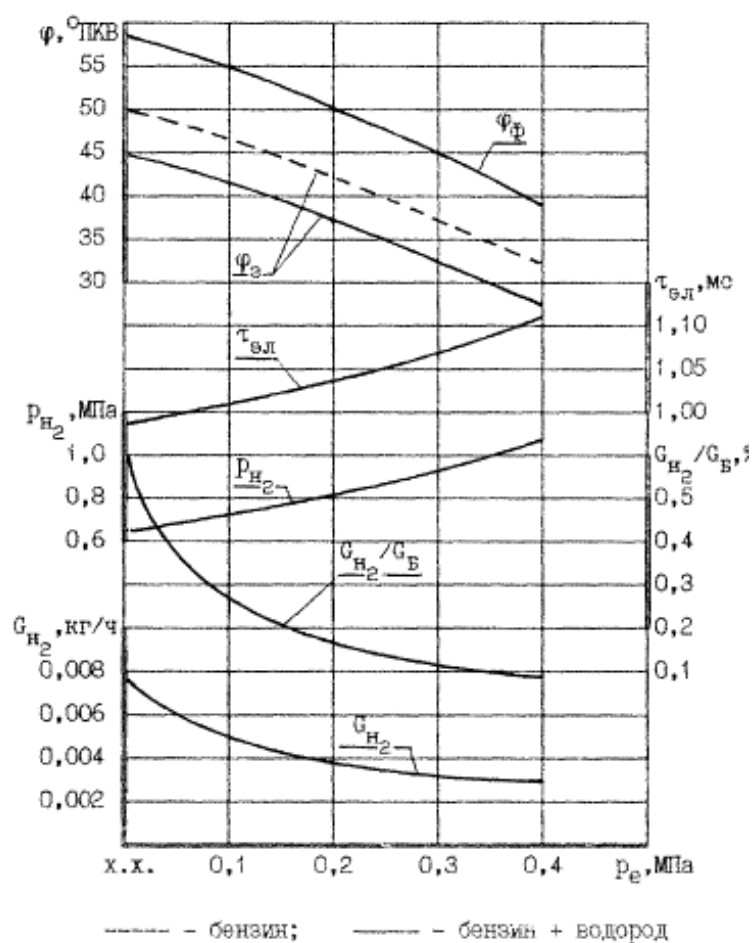


Рисунок 2.11 – Нагрузочная характеристика оптимального регулирования РПД
ВАЗ – 311

Из рисунка 2.11 видно, что влияние добавки водорода на показатели двигателя проявляется при $p_e = 0,4$ МПа и увеличивается с уменьшением нагрузки. Однако величина получаемого при этом эффекта несколько меньше. Это можно объяснить тем, что повышение топливной экономичности составляет 5% при $p_e = 0,19$ МПа и 18% на холостом ходу.

Таблица 2.11 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении нагрузки

P_e , МПа	0,1	0,2	0,3	0,4
G_{H_2} / G_{ϕ} кг/ч	0,28	0,18	0,11	0,08
G_{H_2} , кг/ч	0,005	0,004	0,0032	0,003

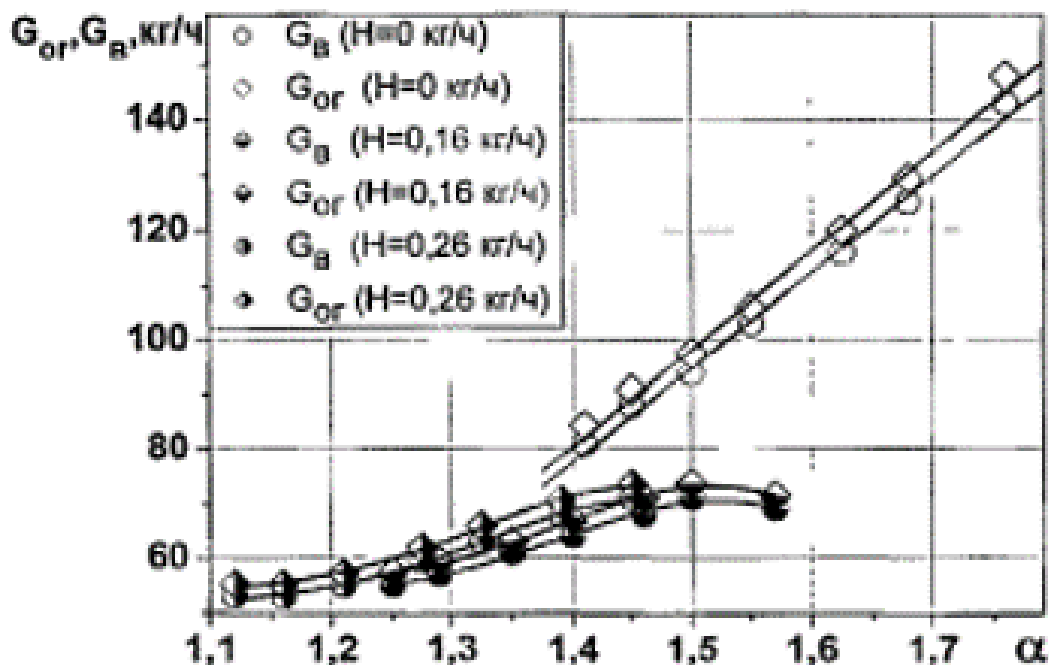


Рисунок 2.12 – Регулировочная характеристика по составу смеси ($n = 800$ мин⁻¹, $P_e = 0$ кг/см², УОЗ = 10 гр. п.к.в.).

На рис. 2.12 приведены изменения расхода воздуха G_B , природного газа G_T и отработавших газов G_{OG} , по коэффициенту избытка воздуха α ($УОЗ = 10$ гр. п.к.в.) при работе двигателя на холостом ходу. Можно видеть, что с увеличением добавок водорода происходит значительное снижение расхода воздуха. Так, при $\alpha = 1,4$ при добавках водорода $H_2 = 0,16-0,26$ кг/ч (что составляет примерно 6-8% от расхода воздуха) расход воздуха снижается с 3,35 до 2,25 кг/ч, т.е. на 27%. Это можно объяснить тем, что водород увеличивает процесс сгорания, что и приводит к снижению массы потребного горючей смеси, необходимого для поддержания заданного режима работы двигателя

Таблица 2.12 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении состава смеси

$G_B, G_{OG}, \text{кг/ч}$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,3$	$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 1,6$
$G_B, (H_2=0)$	-	-	80	99	118
$G_{OG}, (H_2=0)$	-	-	78	95	112
$G_B, (H_2=0)$	50	52	64	70	-
$G_{OG}, (H_2=0)$	50	56	68	70	-
$G_B, (H_2=0)$	57	60	70	72	-
$G_{OG}, (H_2=0)$	57	61	72	72	-

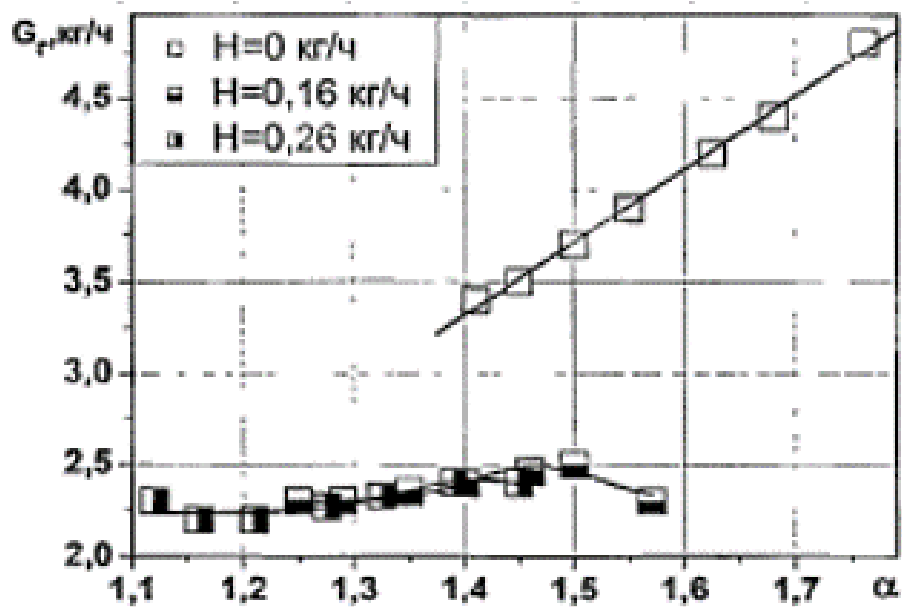


Рисунок 2.13. –Регулировочная характеристика по составу смеси
 $(n = 800 \text{ мин}^{-1}, P_e = 0 \text{ кг/см}^2, \text{УОЗ} = 10 \text{ гр. п.к.в.})$.

На рисунок 2.13 приведены данные, которые дают возможность оценки снижения суммарного массового выхода ОГ. В частности, при $\alpha = 1,5$ и $\alpha = 1,4$ выбросы ОГ уменьшаются с 98 до 74 и с 84,5 до 71 кг/ч соответственно, что составляет 24,5 и 16% по массе.

Таблица 2.13 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении состава смеси

G_T , кг/ч	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,3$	$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 1,6$
$G_T, (H_2=0)$	-	-	3,35	3,75	4,15
$G_T, (H_2=0)$	2,25	2,35	2,45	-	-
$G_T, (H_2=0)$	2,25	2,35	2,44	2,5	-

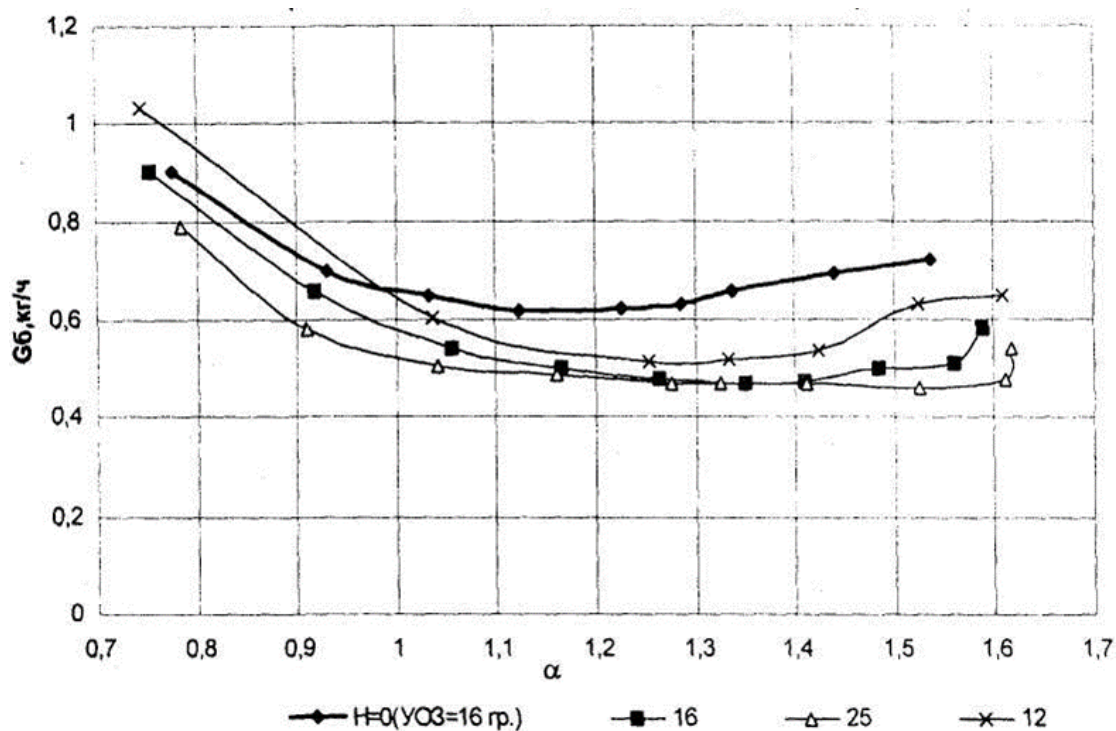


Рисунок 2.14. –Регулировочная характеристика по составу смеси
 $(n = 850 \text{ об/мин}^{-1}; P_e = 0; G_H = 0.013 \text{ кг/ч}; \text{УОЗ} = \text{var})$

Из рисунка 2.14 видно, что расход бензина G_b добавки водорода в области $\alpha = 0,9$, $\alpha = 1$ и $\alpha = 1,2$ как показано в таблице 2.11 значительно не изменяется. При $\alpha = 0,9$ с добавкой водорода $H_2 = 16 \text{ кг/ч}$, расход бензина составляет $G_b = 0,74 \text{ кг/ч}$, а при $\alpha = 1,2$ расход бензина составляет $G_b = 0,63 \text{ кг/ч}$ на 8-12% меньше.

Таблица 2.14 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении составу смеси

№	H_2 , кг/ч	G_b , кг/ч		
		$\alpha = 0,9$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,1$
1	0	0,74	0,66	0,63
2	16	0,68	0,59	0,55
3	25	0,6	0,55	0,55
4	12	0,8	0,64	0,58

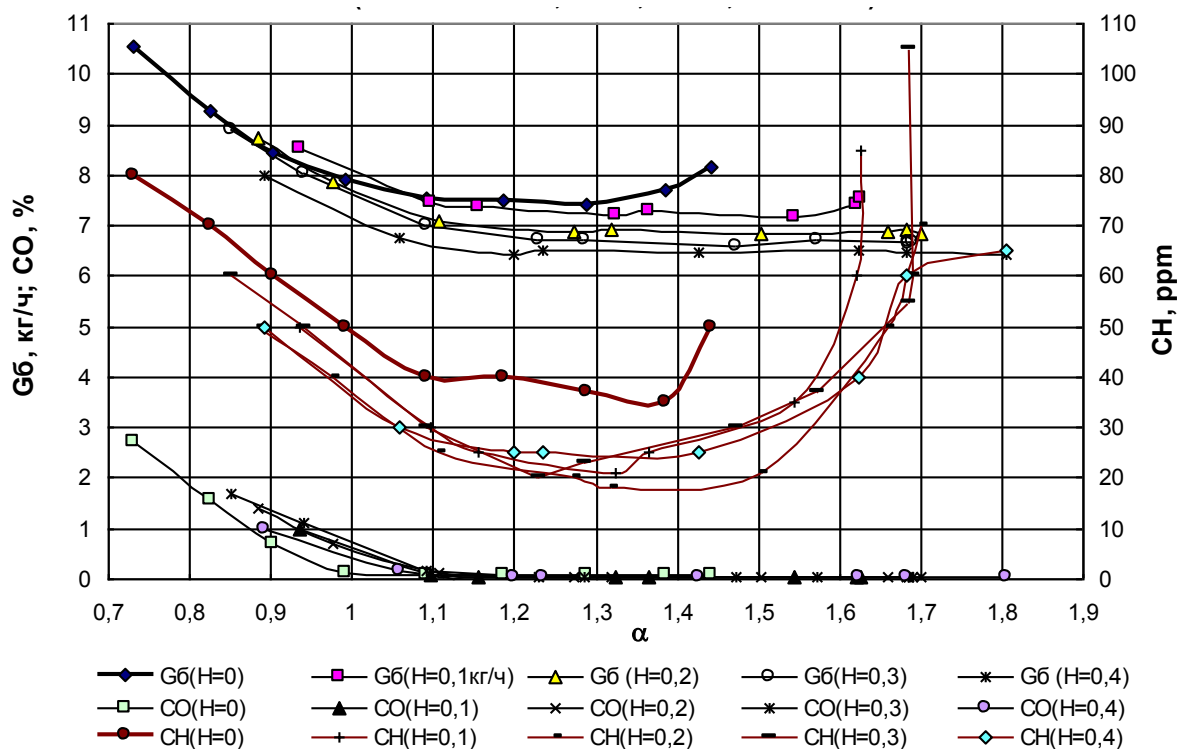


Рисунок 2.15– Регулировочная характеристика по составу смеси ($n = 4370$ об/мин, $P_e = 0,5$ МПа, УОЗ = опт.)

На рисунке 2.15 показано величине расход воздуха G_B , при разном коэффициенте избытке воздуха α (УОЗ = опт.), как видно из таблицы 2.11 при $\alpha = 1$ при добавке водорода 0,1 расход бензина $G_6 = 8,2$ кг/ч, а при $\alpha = 1,2$ расход бензина $G_6 = 7,6$ кг/ч на 12% меньше.

Таблица 2.15 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении составу смеси

№	H_2 , кг/ч	G_6 , кг/ч		Стоимость
		$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$	
1	0	8,2	7,6	128,8
2	0,1	7,9	7,4	141,7

3	0,2	7,8	6,9	157,8
4	0,3	7,7	6,8	173,8
5	0,4	7,2	6,5	183,6

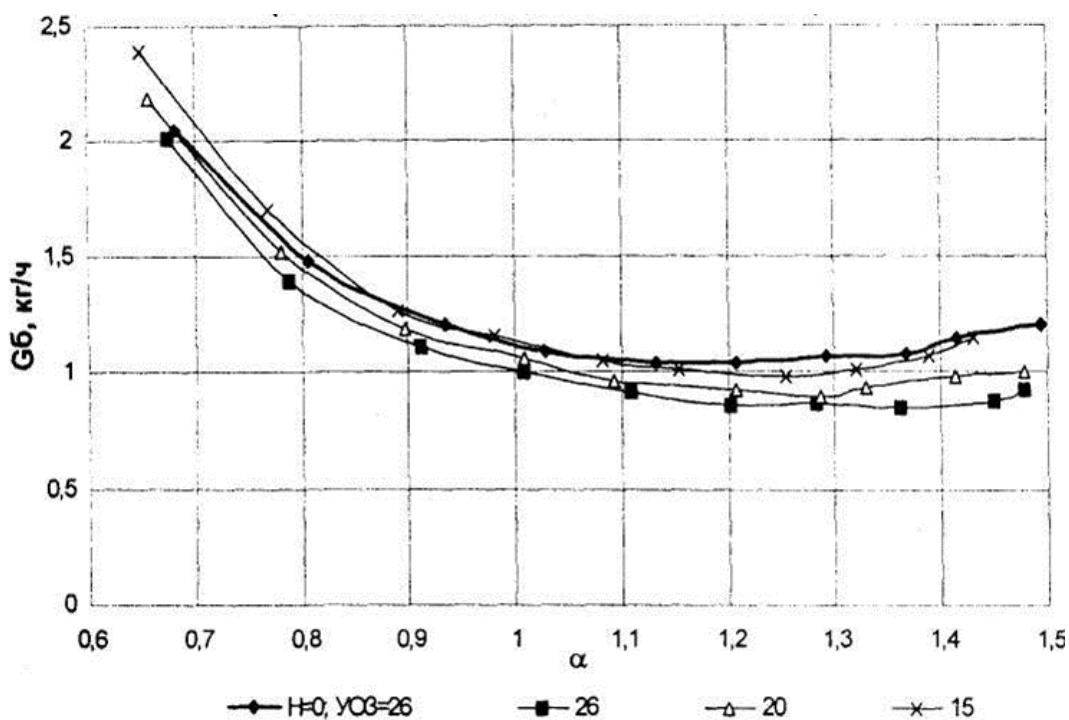


Рисунок 2.16 –Регулировочная характеристика по составу смеси
 $(n = 1500 \text{ об/мин}^{-1}; P_e = 0; G_H = 0.016 \text{ кг/ч}; \text{УОЗ} = \text{var})$

На рисунке 2.16 видно при $\alpha = 0,8$ при добавке водорода 0 - 26 кг/ч расход бензина $G_b = 1,3 - 1,55 \text{ кг/ч}$, при $\alpha = 1,1$ при добавке водорода 0 - 26 кг/ч расход бензина $G_b = 0,8 - 1,22 \text{ кг/ч}$. Это можно объяснить тем, что при большей подаче воздуха расход бензина уменьшается.

Таблица 2.16 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении нагрузки

№	H_2 , кг/ч	G_{δ} , кг/ч			Стоимость
		$\alpha = 0,8$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,1$	
1	0	1,5	1,18	1,12	23,56
2	26	1,3	1	0,8	4605,96
3	20	1,45	1,12	0,9	3550,11
4	15	1,55	1,2	1	2669,85

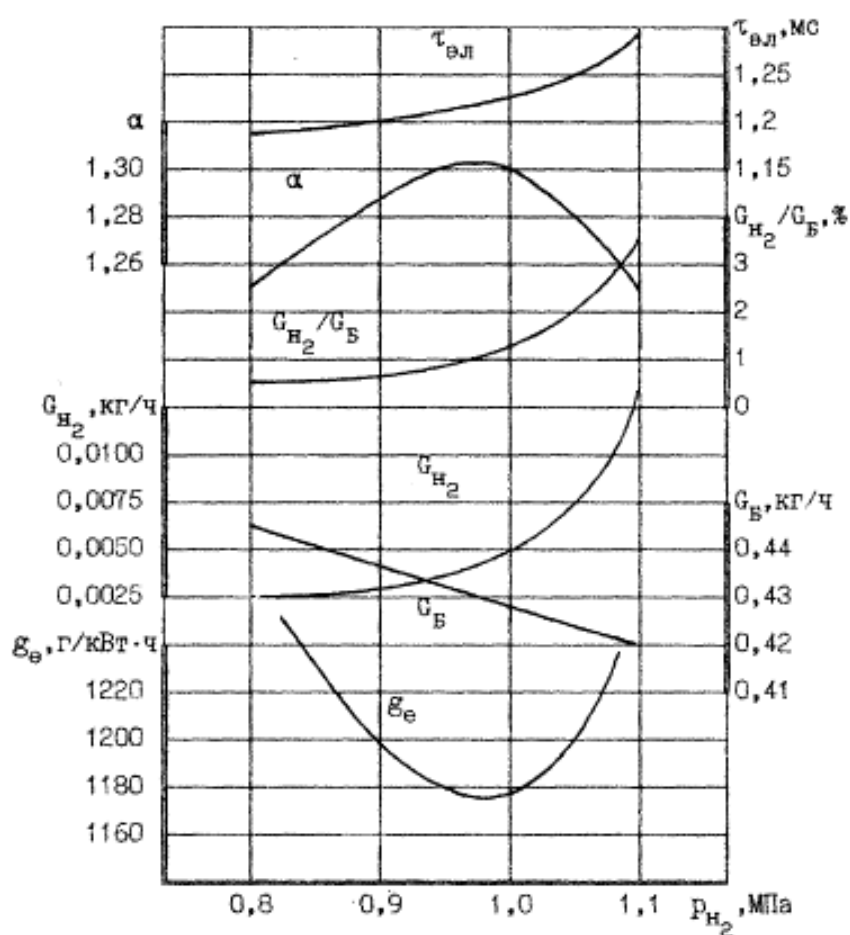


Рисунок 2.17 –Регулировочная характеристика по давлению водорода

$$(P_e = 0,065 \text{ МПа})$$

На рисунке 2.17 показано расход бензина G_B и часовой расход топлива g_e , при нагрузке P_e . Из таблицы 2.17 видно, что расход воздуха и часовой расход топлива увеличивается при повышении нагрузки.

Таблица 2.17 – Влияние добавки водорода на часовой расход топлива при изменении нагрузки

P_e , МПа	0,8	0,9	1,0	1,1
G_B , кг/ч	0,445	0,437	0,427	0,420
G_{H_2} , кг/ч	0,025	0,030	0,0050	0,0130
g_e , г/кВт ч	-	1200	1170	-

Выводы по Главе 2

Во второй главе данной диссертационной работы приведен обзор многочисленных работ по влиянию добавки водорода на процесс сгорания. Выбраны для анализа результаты, показывающие изменение часового расхода топлива при постоянной нагрузке при добавке водорода в жидкое и газообразное углеводородное топливо. На основании анализа состояния рынка определена стоимость углеводородного топлива и водорода, в результате чего рассчитана стоимость потребляемого горючего при одинаковых энергетических показателях работы. Данные результаты показали повышение стоимости

потребляемого топлива при добавке водорода на всех режимах работы и видах топлива.

Глава 3 Обобщения стоимости добавки водорода

Одно из наиболее простых решений по добавке водорода в топливо, которое достаточно легко реализовать, это применение водорода, предварительно заправленного в баллоны под давление до 19,7 МПа на специализированных предприятиях. В таком случае требуется лишь дополнительный комплект газового оборудования и специально откалиброванный контроллер. Обзор интернет предложений показал, что минимальная оптовая стоимость 40 л баллона водорода газообразного технического марки А составляет 991,2 руб. Объем водорода, заправленного в баллон равен $6,3 \text{ м}^3$, что с учетом плотности водорода ($\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$) составляет 0,567 кг. Следовательно, после несложных вычислений мы получили стоимость 1 кг водорода равную 1748 руб. При этом средняя стоимость 1 л бензина по России марки Аи-92 составляет 35,5 руб., а Аи-95 – 38,85 руб. по данным индекса топливных цен «Петрол Плюс», что с учетом средней плотности бензина 750 кг/м^3 составляет 47,33 руб. за 1 кг Аи-92 и 51,8 руб. за 1 кг Аи-95.

3.1 Водород и сжатый природный газ, смешенное тестируемое биотопливо

В современном мире требует от энергетических компаний и государственных организаций, чтобы использовали альтернативные виды топлива. Чтобы удовлетворить эту потребность, несколько производителей автомобилей производят сжиженный природный газ (СПГ) –добавляющийся в топливо. Кроме того, несколько преобразователей модификации бензиновых транспортных средств для работы на бензине и КПП (двухтопливные). Из-за наличия СПГ транспортных средств, многие энергетические компании и правительство приняли СПГ в качестве альтернативного топлива и способ транспортировки. Между тем, недавние исследования показали, что

смешивание водорода с СПГ (HCNG-смесь водорода и природного газа) может сократить выбросы от транспортных средств на КПП. Однако смешивание водорода с СПГ (при не выполнении никаких других модификаций автомобиля) уменьшает мощность двигателя, в результате более низкой объемной доли в плотности энергии водорода по отношению к СПГ. ArizonaPublicService (Аризонское коммунальное обслуживание) и департамент США исследований энергетики транспортных средств (DOE AVTA) указали на необходимость определения величины этих эффектов и их влияние на жизнеспособность использования HCNG в существующих транспортных средствах на КПП.

Для выполнения этой оценки, план работы был разработан, чтобы проверить ускорение выбросы диапазон, и выхлопные пикапа Ford F-150, работающего на 100% СПГ и смесей 15 и 30% HCNG. Эта программа работы была проведена электротранспорта приложений, а задачи 4.10 по МЭ Соглашению о сотрудничестве DE-FC36-00ID-13859. Ford F-150 был ранее протестирован в эксплуатации флота, используя смесь 30% HCNG (МЭ соглашение о сотрудничестве DE-FC36-00ID-13859, задач 4.6).

Испытания автомобиля

Тестируемым автомобилем является модель 2000 года, F-150, обычная кабина пикап оснащен заводской двигатель CNG и 3600 фунтов на квадратный дюйм углеродистой стали топливных баков с емкостью 85 литров. Это был изменен NRG технология в Рино, штат Невада, чтобы работать на смеси сжатого природного газа и 30% водорода (по объему). NRG технология модификации, включают в себя наддув, модификации зажигания и рециркуляции отработавших газов. F-150 был помещен в службу на флот APS в июне 2001 года флот испытания транспортного средства был проведен в период с июня 2001 года по сентябрь 2002 года. После официального тестирования производительности смешанных видов топлива, автомобиль вновь помещали в парке APS. Испытание F-150 параметрической производительности с водородными / СПГ - смешанных видов топлив было проведено в мае и июне

2003 года. В начале этой тестовой программы, транспортное средство набрало 31,678 миль, работающих с HCNG топливом.

Процедуры испытаний на выбросы

Во время предыдущего тестирования флота в Ford F-150, выбросы от испытываемого транспортного средства периодически измеряется. Две различные процедуры испытаний выбросов проводились на транспортное средство, IM240 и FTP-75.

IM240

Осмотр и техническое обслуживание ездового цикла (IM240) используется несколькими государствами для тестирования выбросов легковых транспортных средств малой грузоподъемности. Тест состоит из одной фазы, которая охватывает 240 секунд и 1,96 миль путешествия; он достигает максимальной скорости 56,7 миль в час, при средней скорости 29,4 миль в час. Тест не учитывает холодных стартов, когда выбросы автомобильных обычно являются высокими.

FTP-75

Порядок Федеральных испытаний (FTP-75) является более тщательным испытанием на выбросы, чем IM240. Тест состоит из трех этапов, которые охватывают 1874 секунд и 11,04 миль путешествия, при средней скорости 21,1 миль в час. Три фазы: холодный запуск, переходный, и горячий старт и что происходит через 10 минут после завершения переходного этапа.

Выбросы испытаний, проведенных в рамках текущей программы работы, проводились с использованием FTP-75 испытательный цикл в лаборатории тестирования автомобилей (ATL) объекты, расположенные в Меса, штат Аризона. ATL сертифицирована штатом Аризона, провести Федеральную процедуру испытания. Нормы выбросов Калифорнии используются в настоящем докладе в качестве точки отсчета для выбросов транспортных средств. В настоящее время, с низким уровнем выбросов автомобилей I стандарты (Уровень I) выбросов в силе. Тем не менее, более строгие набор стандартов выбросов, Уровня II, вступит в силу в 2004 году. Нормы выбросов

Калифорнии Уровня II делятся на категории выбросов, на следующие группы: с низким уровнем выбросов транспортных средств, ультранизким транспортные средства выбросов, и суперультра автомобили с низким уровнем выбросов. Стандарты основаны на весовой категории и выбросы оцениваются на тест FTP-75. F-150 испытания транспортного средства для этой программы работы классифицируется по стандартам выбросов в Калифорнии в качестве MDV3.

Ускорение и диапазон процедуры испытания

Процедуры испытаний водородных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) были разработаны для проведения разгона и полигона тестового автомобиля F-150, на топливе с использованием 100% СПГ и смеси 15 и 30% HCNG. Процедура испытания ускорения требует, чтобы транспортное средство ускорялось с места до скорости 100 миль в час, и данные о скорости в зависимости от времени учитываются. Процедура испытания диапазона ДВС водорода требует, чтобы транспортное средство работало при постоянной скорости 45 миль в час, и расстояние в зависимости от времени данные учитывались (собирались). MDV (марка/вид топливной системы) = средней тяжести транспортного средства; MDV3 является классом MDVs с испытательным весом между 5751 и 8500 фунтов, испытания по определению Калифорнии аналогично определению федеральной скорректированной массой транспортного средства (ALVW); Тест веса = (снаряженная масса +ПЭВТС).

Тестирование выбросов

Выбросы от F-150 были измерены в ATL, используя FTP-75 и тестовые циклы IM240 во время июня 2001 года по сентябрь 2002 года автопарком тестирования (Задание 4.6). Во время этого испытания F-150 был вызван исключительно со смесью 30% HCNG. Транспортное средство испытывали несколько раз для проверки результатов. Выбросы монооксида углерода из смеси низкого процента F-150 в среднем 0,26 г/милю из FTP-75 тестов, а по стандарту Калифорнии SULEV 1 г/милю. Выбросы оксидов азота в среднем 0,078 г/милю, недалеко от стандарта ULEV Калифорнии 0,07. Тем не менее, результат первого тестирования NOx (0,063) был по стандарту 0.07, который

основан на выбросах, если машина новая. Не метановые органические газы (NMOG) не были измерены.

Для обеспечения дополнительной точки отсчета для F-150 результатов испытаний выбросов, измерение выбросов из случайно выбранных Ford F-150, оснащенного бензиновым двигателем, был также проведен тест в ATL.

Базовые данные, полученные от предыдущего тестирования F-150 выбросов, во время тестирования флота были дополнены в текущей программе работы путем проведения дополнительного тестирования FTP-75 выбросов для F-150 испытания транспортного средства с использованием топлива 100% СПГ, 15 и 30% HCNG.

Каждый раз, когда топливо было изменено в тестовом автомобиле, это было обусловлено, по крайней мере 100 милями, используя новое топливо, чтобы компьютер управления двигателем, чтобы делать какие-либо автоматические корректировки, необходимые для оптимизации использования нового топлива. FTP-75 - тестирование выбросов в циклах испытаний был проведен ATL, используя процедуры, утвержденные штате Аризона.

Тестирование ускорения

Ускорение испытаний F-150 были проведены на полигонах Даймлеркрайслер Аризона (ПНГ) в соответствии с водородным ДВС автомобиля, ускорения которого проходило процедуры тестирования, для топлив из 100% СПГ, и смеси 15 и 30% HCNG. Испытания проводились с помощью 2.4-мильной прямой дороги в ПНГ. Для каждой из трех смесей топлива, были проведены два комплекта ускорения прогона. Каждый набор состоял из одного ускорения в каждом направлении (Восток и запад) на прямой трассе.

Тестирование диапазона и экономии топлива

Диапазон испытываемого транспортного средства F-150 был также протестирован на ПНГ, в соответствии с водородом ДВС транспортных средств Постоянная скорость Экономии топлива Испытания процедур, для 100% СПГ и смесей 15 и 30% HCNG. Испытания проводились при постоянной скорости 45

миль в час, используя 4,2-километровой скоростной овал трека в ПНГ. Транспортное средство было обусловлено на 60 миль и количество топлива, используемого было определено с помощью математической взаимосвязи между давлением, температурой и массы для идеального газа. Из этих расчетов, экономия топлива в бензин галлон эквивалентов (ГПЭ) определяется математически. Использование экономии топлива и мощность топливных баков (85 литров), заполненных до 3600 фунтов на квадратный дюйм, диапазон тестового автомобиля F-150 для каждого вида топлива было рассчитано. Скорость контролируется вручную водителем, но автомобиль не был оборудован круиз-контролем. Шипы в скорости транспортного средства являются результатом шума системы сбора данных; они не представляют фактические отклонения скорости.

Результаты тестирования выбросов

Выбросы с использованием 100% СПГ, и 15 и 30% HCNG показали значительное снижение выбросов более бензина в NMHC, CO, NO_x и CO₂. Тем не менее, CH₄ и H₂ увеличивается с введением метана на основе СПГ.

Большая часть сокращений в CO, NO_x, и выбросы CO₂ будут достигнуты путем переключения с бензина на СПГ. Дополнительные сокращения CO достигается при более высоких процентных смесях водорода в СПГ. Тем не менее, NO_x увеличивается с более высокими процентами смесей. Обратите внимание, что уровни NO_x измеренные в текущей программе работы, значительно выше, чем измеренные в ходе операции флот F-150 тест-транспортного средства с использованием 30% смеси водорода в СПГ. Тестирование флот был проведен с от 1500 до 4000 миль на автомобиле. Тестирование в текущей программе работы было проведено с использованием транспортного средства вблизи 30000 миль. Старение каталитического нейтрализатора, стала причина увеличения выбросов NO_x.

На основании этих результатов, очевидно, что снижение CO и CO₂ выбросов может быть достигнуто путем смешивания водорода с СПГ для использования в СПГ флота. Эти сокращения выбросов приведут в какой-то

стоимости в условиях повышенной CH_4 и выбросы УВ и снижение ускорения транспортного средства и расстояния. Тем не менее, даже при 15% HCNG, сокращение производительности не имеют значительное влияние на управляемость автомобиля и предлагают дополнительные 10% снижение CO и выбросов CO_2 .

Результаты тестирования ускорения

Как и ожидалось, производительность (в плане ускорения и диапазона) тестового автомобиля F-150 ухудшается с увеличением количества водорода в топливе. Однако, большая часть результатов потери производительности от начальной перейти от жидкого топлива (бензин) в газообразное топливо (CNG). Деграция в результате ускорения от использования водорода в топливе не оказывают значительное влияние на управляемость до смесей, приближающихся 30% водорода используются. В смеси 15% HCNG, ускорение испытательное транспортное средство F-150 был в пределах 10%, что с транспортного средства, работающего на 100% СПГ.

Деграция ускорения может быть исправлена посредством увеличения количества топлива, поступающего с воздухом в цилиндры двигателя, или путем инъекций, непосредственно водорода в цилиндр, чтобы избежать смещения воздуха в водородное топливо. Тем не менее, это требует дополнительных модификаций автомобилей, которые не кажутся экономически невыгодно для введения смешанного топлива в существующие флота СПГ.

Результаты тестов экономии и диапазона топлива

Деграция в диапазоне транспортного средства была значительна с 30% HCNG топлива. Уменьшение основано на меньшую энергию водорода по сравнению с СПГ на основе объемной. Уменьшение диапазона между 100% СПГ и 30% HCNG потребует увеличения бортового хранения топлива 16,4% для поддержания спектра транспортного средства, аналогично достижимо с 100% СПГ. В случае испытываемого транспортного средства F-150, это требует добавления топливного бака 14 л. С топливом 15% HCNG, деграция диапазона была меньше, чем 10%, которые должны иметь незначительное

влияние на транспортное средство в эксплуатации флота.

Обратите внимание, что никаких существенных изменений в эффективности (в пределах точности методов испытаний) не было отмечено для топлива испытания. Экономия топлива для постоянной скорости испытания 45 миль в час диапазон был 23,3 мили / GGE для 100% СПГ, 22,6 мили / GGE для 15% HCNG и 23,5 мили / GGE для 30% HCNG.

3.3 Новая технология переработки отходов пластмасс углеводородное топливо в США

Энергетический кризис и ухудшение состояния окружающей среды полимерными отходами вынуждают находить и предлагать технологии для восстановления сырья и энергии из нетрадиционных источников, таких как пластиковые отходы. Разнообразные методики и процессы, связанные с мировой или национальной политикой, предлагаются во всем мире. Новый тип стального реактора предложен для преобразования пластмассовых отходов в топливо, как смесь углеводородов. Результаты термической деструкции отходов полимерных материалов в лабораторных условиях опираясь на систему этих задокументированных процессов. Процессы плавления и термического крекинга проводились в единственной производственной партии температурном диапазоне 200-420 ° C. Конечный продукт состоял на 6.3% из легкого газа и на 90% из жидкого продукта. 3.7% сплошного черного продукта было произведено. Частицы света, 'газа' примеси углеводородов (C1–C4) и остальное жидкое топливо составляет свыше 90% жидкого продукта. Это может использоваться для производства топлива или генерирования электроэнергии.

Эффект от утилизации пластиковых отходов является жизненно важным для реализации хорошо известных "трех R", сокращение, повторное использование и переработка. Методы для достижения "трех R" должны быть созданы. В последние годы примерно 15 миллионов тонн в использованных

пластиковые отходов в Европе каждый год, в то время как в США 20 млн. т отходов [1]. Эффективность использования “трех R” способов зависят от качества и состояния пластических материалов. Однако, в настоящее время, скорость извлечения энергии из пластмассовых отходов составляет 41%, с 18% эффективно применяются для переработки материалов и только 3% используется для химической переработки. Позже этот процент должен быть существенно увеличен, так как для сокращения потребления природных ресурсов и уменьшения загрязнения окружающей среды.

Быстрые темпы потребления пластика во всем мире привело к возрастанию вредных отходов, а это в свою очередь создает большие трудности для утилизации. Это объясняется тем, что продолжительность жизни пластиковых отходов очень мала [2] и в зависимости от области применения, срок службы пластиковых изделий колеблется от 1 до 35 лет [3]. Средневзвешенный срок службы всех изделий из пластмасс отличается в разных странах в основном от уровня жизни и экономики. Пластиковые отходы классифицируются по их происхождению: промышленные и муниципальные отходы пластмассы, эти группы имеют различные качества и свойства, и подвергаются различным стратегиям управления [4]. Отходы пластмассы составляют значительную часть муниципальных отходов; кроме того, огромное количество отходов пластика возникают как побочный продукт или неисправный продукт в промышленности и сельском хозяйстве [5]. Термопласт массы состоят из полиолефина, например, полиэтилена высокой плотности (HDPE), полиэтилена низкой плотности (LDPE), полипропилена (PP), полистирол (PS), полиэтилентерефталат (PETE) и поливинилхлорид (ПВХ) [6] и может быть из вторсырья. С другой стороны, реактопласты в основном включают в себя эпоксидные смолы и полиуретаны и не могут быть вторсырьём.

Несколько методов для химической переработки, в настоящее время, такие как прямая химическая обработка с применением газификации, плавки в доменной печи [7] или коксовой печи [8], и разложение по сжижению [9] и

газификация [10]. Полимеры конденсации, такие как PETE и нейлона подвергаются разложению для производства мономерных звеньев [11], в то время как из виниловых полимеров, таких как полиолефины, смеси содержащих многочисленные компоненты могут быть получены для использования в качестве топлива. Каталитического крекинга и риформинга содействия избирательным в процессе разложения отходов пластмасс. Использование твердых катализаторов, таких как диоксид кремния, оксид алюминия, цеолита zsm-5 мезопористых материалов [11-15] для этих целей не поступало. Эти материалы эффективно конвертировать полиолефины в жидкое топливо, давая более легкие фракции по сравнению с термическим крекингом. Термическое разложение смешанных пластмасс в настоящее время получает новый интерес в качестве маршрута для утилизации, если большие объемы пластиковых отходов собирать с помощью различных систем сбора. Преимущество тепловой деградации макромолекул в вакууме (пиролиз) по сравнению с горением сокращается количество отработанных газов в 5-20 раз, которая приводит к значительному сбережению газа, состояния оборудования. Кроме того, возможно получение ценных углеводородных соединений. Пиролиз осложняется тем, что показывают плохую теплопроводность пластмасс во время разрушения макромолекул требует огромного количества энергии. Цель данной работы продемонстрировать новые технологии с использованием термической деструкции для преобразования огромного количества пластиковых отходов в полезное углеводородное топливо. Эффективность данной технологии является надежной и применение осуществимо по низкой стоимости.

Выводы по Главе 3

Проведенный анализ существующих зарубежных технологий показал наличие современных перспективных и новых возможностей для значительного снижения себестоимости получения, транспортировки и

хранения водорода, что позволяет снизить его стоимость в десятки раз и сделать данный продукт привлекательным для потребителей.

Глава 4 Влияние добавки водорода на стоимость топлива в ДВС с искровым зажиганием

Одно из наиболее простых решений по добавке водорода в топливо, которое достаточно легко реализовать, это применение водорода, предварительно заправленного в баллоны под давление до 19,7 МПа на специализированных предприятиях. В таком случае требуется лишь дополнительный комплект газового оборудования и специально откалиброванный контроллер. Обзор интернет предложений показал, что минимальная оптовая стоимость 40 л баллона водорода газообразного технического марки А составляет 991,2 руб. Объем водорода, заправленного в баллон равен 6,3 м³, что с учетом плотности водорода ($\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$) составляет 0,567 кг. Следовательно, после несложных вычислений мы получили стоимость 1 кг водорода равную 1748 руб. При этом средняя стоимость 1 л бензина по России марки Аи-92 составляет 35,5 руб., а Аи-95 – 38,85 руб. по данным индекса топливных цен «Петрол Плюс», что с учетом средней плотности бензина 750 кг/м³ составляет 47,33 руб. за 1 кг Аи-92 и 51,8 руб. за 1 кг Аи-95.

Таблица 4.1 – Экономическая эффективности добавки водорода при работе на бензине Аи-92

$n, \text{ мин}^{-1}$	$N_e, \text{ МПа}$		$G_{t_0}, \text{ кг/ч}$		$G_{t_{H_2}}, \text{ кг/ч}$	Суммарная цена расхода топлива, руб.	Цена бензина при которой появляется экономия, руб/л.
2000	34,4	34,4	10	8,5	0,25	118,33	-
2500	43,8	43,9	12,2	10,5	0,32	278,95	440
3000	51,8	51,9	15	12,5	0,4	437,19	403
3500	56	56,5	17,6	14	0,45	767,89	500

4000	60	60,5	19,8	15,9	0,48	926,14	470
4500	61	61,5	21,8	17,8	0,54	26,51	-

Из таблицы 4.1 видно, что экономическая эффективность применения добавок водорода возможна лишь при значительном повышении стоимости бензина до 150-200 руб. за 1 л. При этом количество добавляемого водорода должна быть минимальна и варьироваться до 0,02 кг/ч, что указывает об актуальности исследований именно небольших добавок водорода, что также соответствует возможностям бортовых электролизеров.

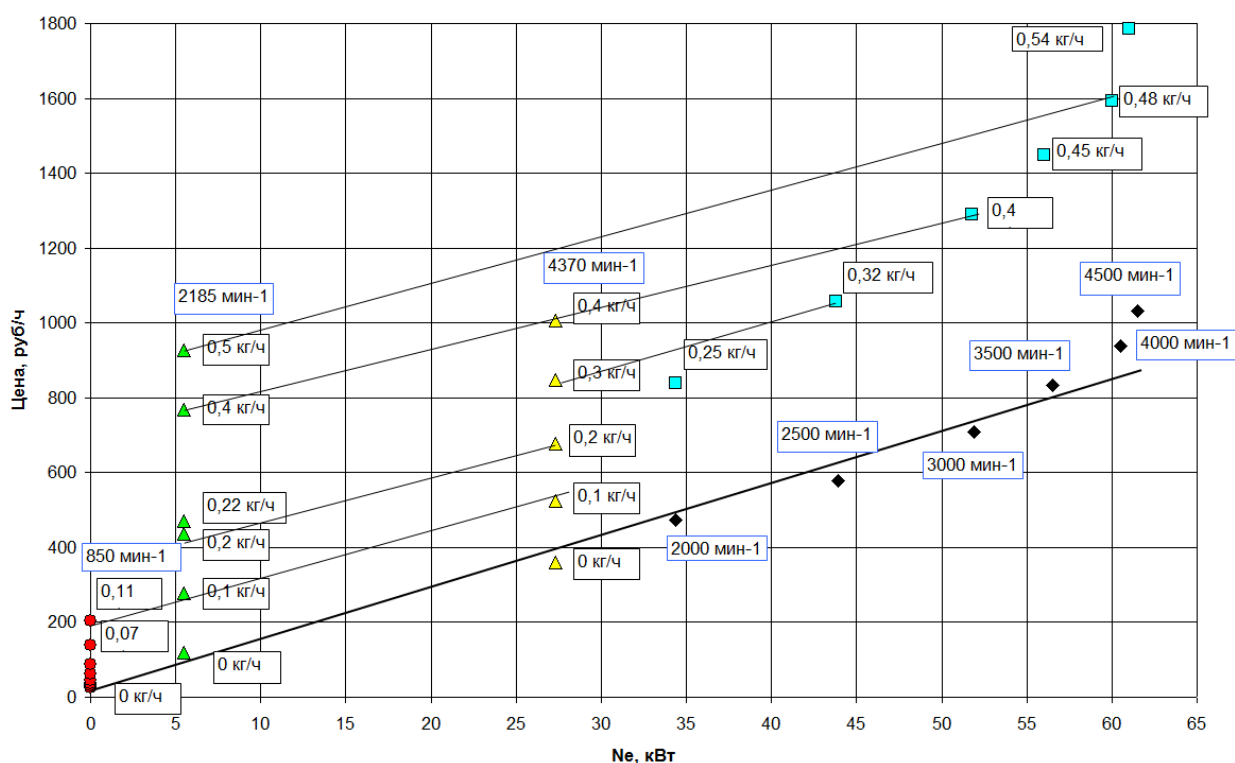


Рисунок 4.1 – Экономическая эффективности добавки водорода при работе на бензине Аи-92

Следовательно, после несложных вычислений мы получили стоимость 1 кг водорода равную 1748 руб. При этом средняя стоимость 1 л бензина по России марки Аи-92 составляет 35,5 руб. по данным индекса топливных цен

«Петрол Плюс», что с учетом средней плотности бензина 750 кг/м^3 составляет 47,33 руб. за 1 кг Аи-92.

Из рисунка 4.1 видно, что экономическая эффективность применения добавок водорода возможна лишь при значительном повышении стоимости бензина до 150-200 руб. за 1 л. При этом количество добавляемого водорода должна быть минимальна и варьироваться до 0,02 кг/ч, что указывает об актуальности исследований именно небольших добавок водорода, что также соответствует возможностям бортовых электролизеров.

Обобщая сказанное следует сделать вывод, что экономически оправданным применение добавки водорода станет в том случае если значительно снизится его стоимость (в 3-4 раза), или значительно подорожает бензин при сохранении стоимости водорода.

4.2 Оценка экономической эффективности добавки водорода в качестве активатора горения сжатого природного газа

Исследованиями возможности применения добавок водорода для повышения эффективности процесса сгорания в условия поршневых ДВС с искровым зажиганием, в том числе и при работе на режимах глубокого дросселирования, занимались такие отечественные ученые как Р.З. Кавтарадзе, В.Ф. Каменев, В.Н. Луканин, В.М. Фомин, Н.А. Хрипач, В.И. Хмыров, Г.Б. Талда, Ю.В. Галышев, А.Ю. Раменский, В.З. Гибадуллин, А.П. Шайкин, В.В. Румянцев, В.А. Вагнер, А.В. Белогуб, Л.Н. Бортников, Н.М. Смоленская и другие.

Проведенный анализ научных исследований показал следующее, при использовании добавки водорода в газовое топливо происходит значительная интенсификация процесса сгорания, что значительно сказывается на характеристиках работы ДВС, особенно это заметно при работе на режимах глубокого дросселирования, как самых неблагоприятных по экономическим и экологическим показателям. Соответственно, применение газовых топливных

композиций природного газа и водорода можно рассматривать как эффективное альтернативное топливо, в котором водород представлен в качестве активного компонента для регулирования процесса горения в условиях поршневого ДВС на газовом топливе.

Также перспективность и экономическая выгода от применения водорода в качестве добавки к сжатому природному газу заключается в том, что смесь природного газа с водородом может заправляться в баллоны на газовых заправочных станциях, что позволяет работать на существующей системе питания природным газом с откорректированными настройками контроллера.

Обзор интернет предложений показал, что минимальная оптовая стоимость 40 л баллона водорода газообразного технического марки А составляет 991,2 руб. Объем водорода, заправленного в баллон равен $6,3 \text{ м}^3$, что с учетом плотности водорода ($\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$) составляет 0,567 кг. Следовательно, получаем стоимость 1 кг водорода равную 1748 руб. При этом средняя стоимость сжатого природного газа (КПГ) составляет 13 руб. за 1 м^3 , по данным сайта ГАЗПРОМ, что с учетом плотности природного газа ($\rho = 0,8275 \text{ кг/м}^3$) составляет 15,71 руб. за 1 кг.

Проведем анализ результатов экспериментальных исследований, представленных в работах [1,2,3,4] по влиянию добавки водорода на снижение расхода природного газа. Испытания проводились на двигателе ВАЗ-2111 оборудованном системой подачи природного газа 2 поколения, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$, данные сведены в таблицу 1 [1,2], и на двигатель КАМАЗ – 820.53-260 при $\alpha = 1,3$ представленные в таблице 2 [3,4].

Таблица 4.2 – Экономическая эффективности добавки водорода при работе на КПГ двигателя ВАЗ-2111 при $\alpha = 1$.

$n, \text{ мин}^{-1}$	$N_e, \text{ кВт}$	$G_{\text{H}_2}, \text{ кг/ч}$	$G_{\text{КПГ}}, \text{ кг/ч}$	Суммарная цена расхода топлива, руб.	Цена КПГ при которой появляется экономия, руб/м ³ .
-----------------------	--------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------------	--

880	0	0	0,553	8,69	-
880	0	0,02	0,433	41,77	240
880	0	0,03	0,397	58,68	280

Таблица 4.3 – Экономическая эффективности добавки водорода при работе на КПП двигателя КАМАЗ – 820.53-260 при $\alpha = 1,3$.

$n, \text{мин}^{-1}$	$N_e, \text{кВт}$	$G_{tH_2}, \text{кг/ч}$	$G_{tKPP}, \text{кг/ч}$	Суммарная цена расхода топлива, руб.	Цена КПП при которой появляется экономия, руб/м ³ .
1500	21	0	9	141,38	-
1500	21	0,26	7,9	578,62	340
1500	21	0,44	7,4	885,44	390

Анализируя полученные данные можно сделать вывод о том, что применение водорода в качестве добавки к природному газу становится экономически оправданным только при значительном снижении стоимости водорода, примерно до величины в 80-100 руб. за 40 л баллон. А в настоящее время при существующей стоимости водорода его применение, не смотря на значительное улучшение рабочего процесса, является экономически не оправданным и ожидать столь значительного роста цены на природный газ вряд ли разумно.

В представленной статье не оценивалась стоимость получения водорода на борту автомобиля, что может несколько снизить стоимость водорода и повысить его привлекательность для потребителей. Но при получении водорода

за счет автономных источников потребуются дополнительные затраты на систему дозирования и подачи водорода, что снижает привлекательность данного подхода.

Выводы по главе 4

Выводом по данной работе будет следующее: для повышения экономической привлекательности применения смесевых газовых топлив, требуется значительное снижение стоимости водорода до 10-15 руб. за 1 м³, а также развитие инфраструктуры газозаправочных станций с готовым композитным газо-водородным топливом с объемными долями водорода не более 5-10%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе исследования был проведен анализ возможности экономически эффективного применения добавки водорода в топливо.

В результате проведенный анализ возможности получения водорода и его стоимости в розничной продаже показал отсутствие дешевых вариантов приобретения водорода, так минимальная цена на 40 л баллона водорода газообразного технического марки А составляет 991,2 руб, что с учетом плотности водорода ($\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$) получили стоимость 1 кг водорода равную 1748 руб.

Проведенный анализ экспериментальных данных по выявлению влияния добавки водорода на изменение расхода основного горючего, показал, что наибольший эффект от добавки водорода наблюдается в зоне низких нагрузок и холостого хода, что показывает нецелесообразность постоянной подачи водорода на всем диапазоне режимов работы двигателя.

Выявлены условия экономической эффективности применения водорода в качестве добавки к основному топливу, показавшие, что экономическая эффективность применения добавок водорода возможна лишь при значительном повышении стоимости бензина до 150-200 руб. за 1 л. При этом количество добавляемого водорода должна быть минимальна и варьироваться до 0,02 кг/ч, что указывает об актуальности исследований именно небольших добавок водорода, что также соответствует возможностям бортовых электролизеров.

Обобщая сказанное следует сделать вывод, что экономически оправданным применение добавки водорода станет в том случае если значительно снизится его стоимость (в 3-4 раза), или значительно подорожает бензин при сохранении стоимости водорода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Талда Г.Б. Повышение топливной экономичности и снижение токсичности бензиновых двигателей добавке водорода к бензину / Москва 2007. С. 214.
2. Мисбахов Р.Ш. Влияние добавок водорода на технико-экономические и экологические показатели газовых и дизельных двигателей // дис. ... канд. тех. наук: 05.04.02. Казань, 2010. – 165 с.
3. Смоленский В.В., Смоленская, Н.М. Влияние добавки H_2 в сжатый природный газ на концентрацию NO_x в ОГ ДВС с искровым зажиганием // Естественные и технические науки. 2013 №4. 39-44.
4. Бортников Л.Н. Использование водорода как активатора горения для улучшения показателей ДВС с искровым зажиганием на режимах пуска и прогрева / Л.Н. Бортников, Д.А. Павлов, М.М. Русаков, В.В. Смоленский // Естественные и технические науки. 2013. № 1 (63). С. 341-345.
5. Бортников Л.Н. Современные аспекты применения водорода в автомобильных двигателях // Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. 158.
6. Бортников Л.Н. Применение водорода для повышения полноты сгорания ТВС на режимах пуска и прогрева / Л.Н. Бортников, Д.А. Павлов, М.М. Русаков, В.В. Смоленский // Естественные и технические науки. 2013. № 1 (63). С. 346-350.
7. Галышев Ю.В., Конвертирование рабочего процесса транспортных двс на природный газ и водород //Галышев Ю.В., Санкт Петербург 2010. с. 417.
8. Павлов Д.А., Снижения выбросов углеводородов на режиме пуска и прогрева бензинового двигателя добавки водорода в тепловоздушной смесь // Естественные и технические науки. 2006. с. 89-186.
9. Румянцев В.В., Рабочий процесс малотоксичного транспортного двигателя, работавшие с добавки водорода водяного пара // Румянцев В.В., Ленинград 1987. с. 122-189.

10. Гибадуллин В.З., Организация рабочего процесса ДВС с внешним смесеобразованием и локальной подачи микродобавок водорода в область межэлектродного зазора свечи зажигания // Гибадуллин В.З., Волгоград 1992. с 156-200с

11. Корнеев Н.В., Смоленская, Н.М. Моделирование скорости распространения фронта пламени природного газа с добавками водорода // Машиностроитель. 2015. № 5. С. 8–12.

12. Белогуб А.В., Разработка и исследования топливной аппаратуры для ДВС, работающих на смеси бензина и водорода // Белогуб А.В., Российская государственная библиотека 2007. с. 138-173.

13. Асмус Т.У. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т.У. Асмус, К. Бриннакке и др.; под ред. Д. Хиллиарада, Дж. С. Спрингера; перевод с англ. Васильева; под ред. А.В. Кострова. - М.: Машиностроение, 1988. с. 23.

14. Афанасьев А.Н. Влияние добавки водорода на токсичность бензинового двигателя на режимах пуска и прогрева/ А.Н. Афанасьев, Л.Н. Бортников, Д.А. Павлов; всероссийская науч.-практическая конференция с международным участием (2004, Тольятти). Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные тенденции развития автомобилестроения в России», 26-28 мая 2004г.: посвящ. 30-летию кафедр «Автомобили и тракторы» и «Тепловые двигатели» / редкол.: Т.Г. Лаврова - Тольятти: ТГУ, 2004. - 43 с.; - 300 экз.

15. Афанасьев А.Н. Токсичность автомобиля ВАЗ-21012 при работе с добавкой водорода на режиме пуска и прогрева/ А.Н. Афанасьев, Л.Н. Бортников, Д.А. Павлов и др.; всероссийская науч.-практическая конференция с международным участием (2004, Тольятти). Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные тенденции развития автомобилестроения в России», 26-28 мая 2004г.: посвящ. 30-летию кафедр «Автомобили и тракторы» и «Тепловые двигатели» / редкол.: Т.Г. Лаврова - Тольятти: ТГУ, 2004. – 43 с.: - 300 экз.

16. Гамбург Д.Ю. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справ. Изд. / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнова. Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. -М.: Химия. - 1989.

17. Злотом Г.И. Влияние добавки водорода на продолжительность первой фазы сгорания в карбюраторном двигателе / Г.И. Злотин и др.; Сборник докладов Рабочие процессы в поршневых ДВС. - 979.

18. Каштанов Н. О применении водорода в карбюраторных и дизельных двигателях / Н. Каштанов и др.; Сборник научных трудов Проблемы экономии топлива на автомобильном транспорте. - МАДИ. - 1983.

19. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей / А.И. Мищенко; Киев: Наука думка, 1984.

20. Расчетные результаты математического моделирования горения бензовоздушных смесей с различными значениями коэффициентов избытка воздуха при добавках водорода: отчет о работе по государственному контракту Лг КО 121(21-98) Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997-2000 годы» / ТПИ – Институт гидродинамики им. М.Л. Лаврентьева СО РАН. - 1999.

21. Абрамов, С.А. О работах в ФРГ по применению метанола в качестве моторного топлива [Текст] / С.А. Абрамов, В.А. Гладких, В.П. Попов. – Двигателестроение, 1983 – № 8 –с. 55-57.

22. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

23. Охрана окружающей среды: Модели социально-экономического прогноза[Текст] / Ананиашвили Д.П. [и др.]. –М.: Экономика, 1982. – 224с.

24. Архангельский, В. М. Автомобильные двигатели [Текст] / В. М. Архангельский, М. М. Вихерт, А. Н. Воинов. – М.: Машиностроение, 1977. – 591 с.

25. Архангельский, В.М. Работа карбюраторных двигателей на неустановившихся режимах[Текст] / В.М. Архангельский, Г.Н.Злотин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
26. Gortyshov, Y.F., Gureev, V.M., Misbakhov, R.S., Gumerov, I.F., Shaikin, A.P. Influence of fuel hydrogen additives on the characteristics of a gas-piston engine under changes of an ignition advance angle // Russian Aeronautics, 52 (4), 2009. pp. 488-490.
27. Hydrogen/CNG Blended Fuels Performance Testing. [Электронныйресурс]: Don Karner, Francfort J. - URL : <http://avt.inel.gov/pdf/hydrogen/30percentf150noattachments.pdf>
28. Solar activity and transformer failures in the Italy national electric grid. [Электронныйресурс]:ZoisIoannis Panayiotis – URL: <https://doaj.org>.
29. Decision Support using a Multi-Agent System for Hardware Upgrades in Smart Grids. [Электронныйресурс]: Ala Shaabana, Sami Syed, ZiadKobti, Kemal Tepe – URL: <https://doaj.org>.
30. DEVELOPMENT DRIVE KINETIC ENERGY OF THE FLYWHEEL TYPE MAGNETIC AXES. [Электронныйресурс]: Magnus Hedlund, Johan Lundin, Juan de Santiago, - URL: <http://doaj.org>. / 2015;8(10):10636-10663 DOI 10.3390/en81010636
31. Step-up transformers. [Электронныйресурс]:NikolinaPetkova. - URL:<http://doaj.org>. / 2015;4(2):125
32. ENERGY EFFICIENCY COMBINED-CYCLE PLAN. [Электронныйресурс]: u-Ting Wu, Biao Lei, Chong-Fang Ma, Lei Zhao. - URL: <http://doaj.org>.
33. Analysis of energy and greenhouse gas balance as indexes for environmental assessment of wheat and maize farming. [Электронныйресурс]:Móslem SAMI, Mohammad Javad SHIEKHDAVOODI, Morteza ALMASSI- URL : <http://doaj.org>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты экспериментальных исследований по воздействию водорода на показатели ДВС (ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

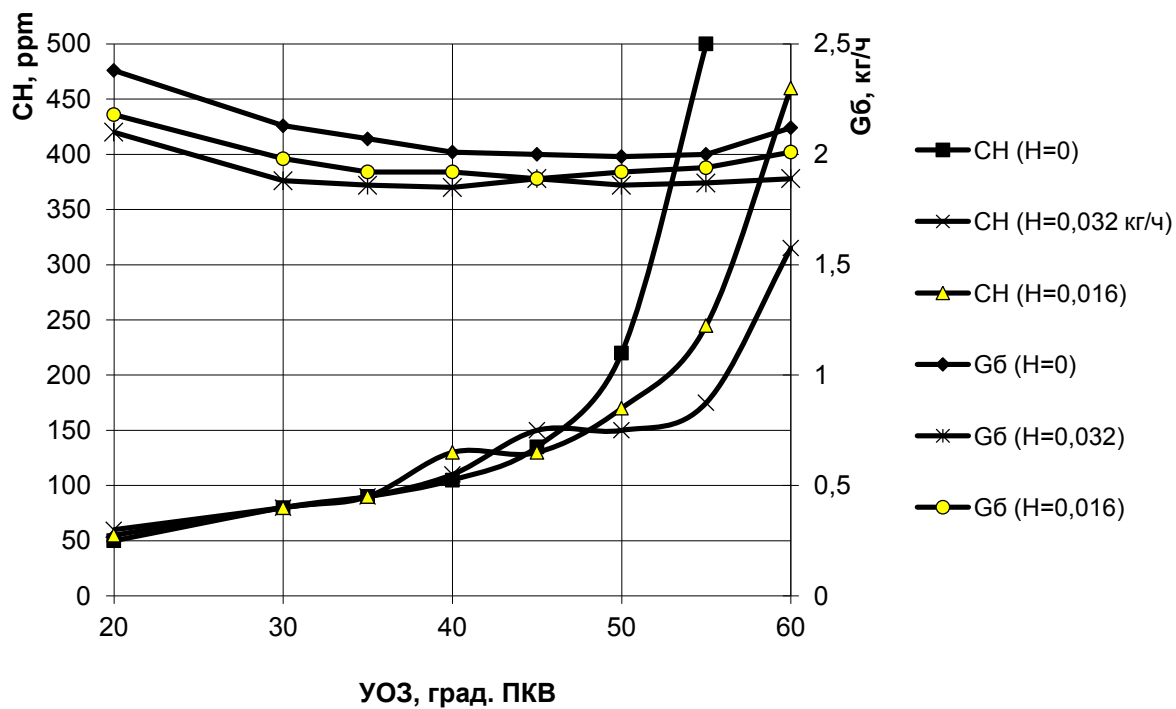


Рисунок А.1 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n = 2000$ об/мин; $P_e = 0,2$ МПа; $\alpha = 1,22$).

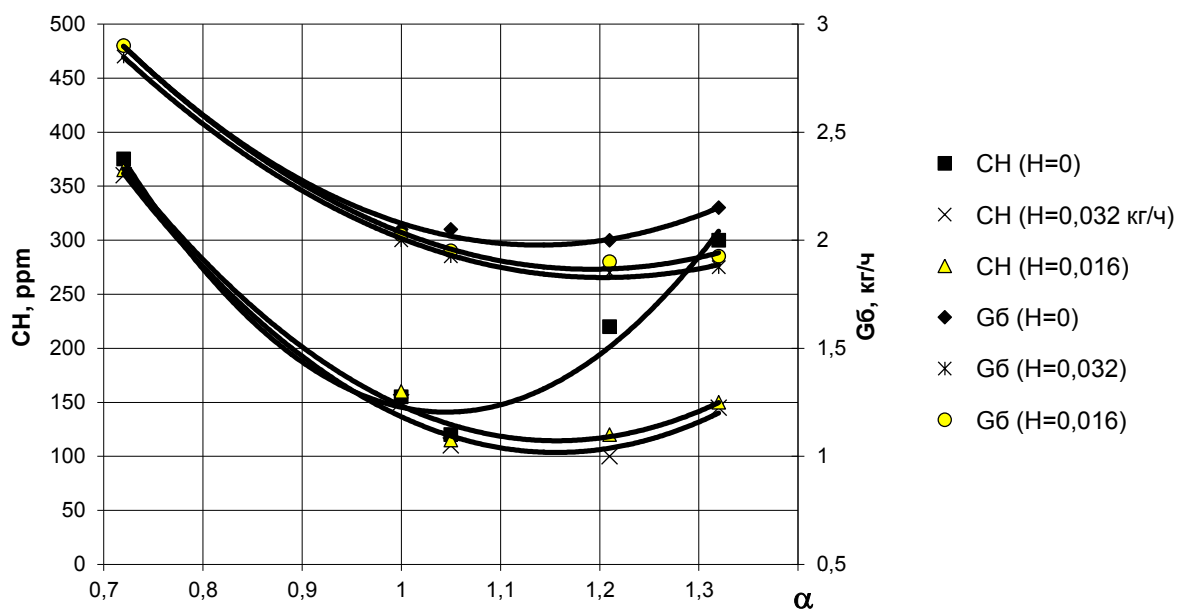


Рисунок А.2 – Характеристика по составу смеси

($n = 2000$ об/мин; $Pe = 0,2$ МПа; УОЗ=опт.)

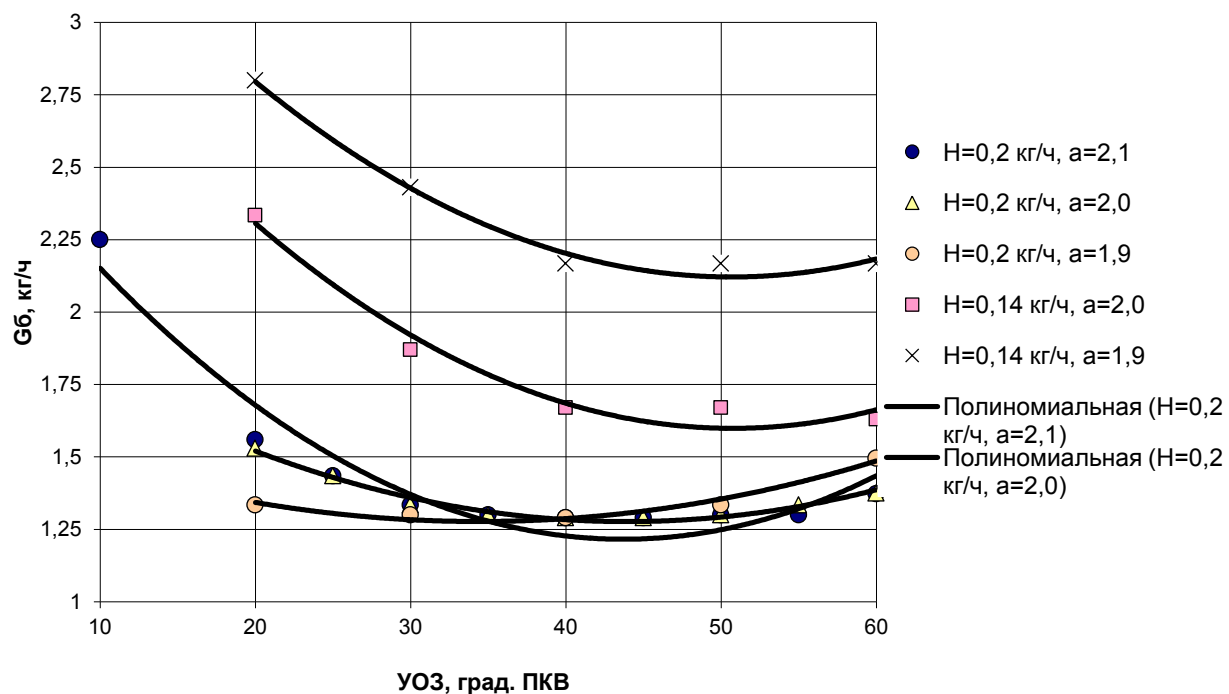


Рисунок А.3 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n = 2185$ об/мин; $Pe = 0,2$ МПа)

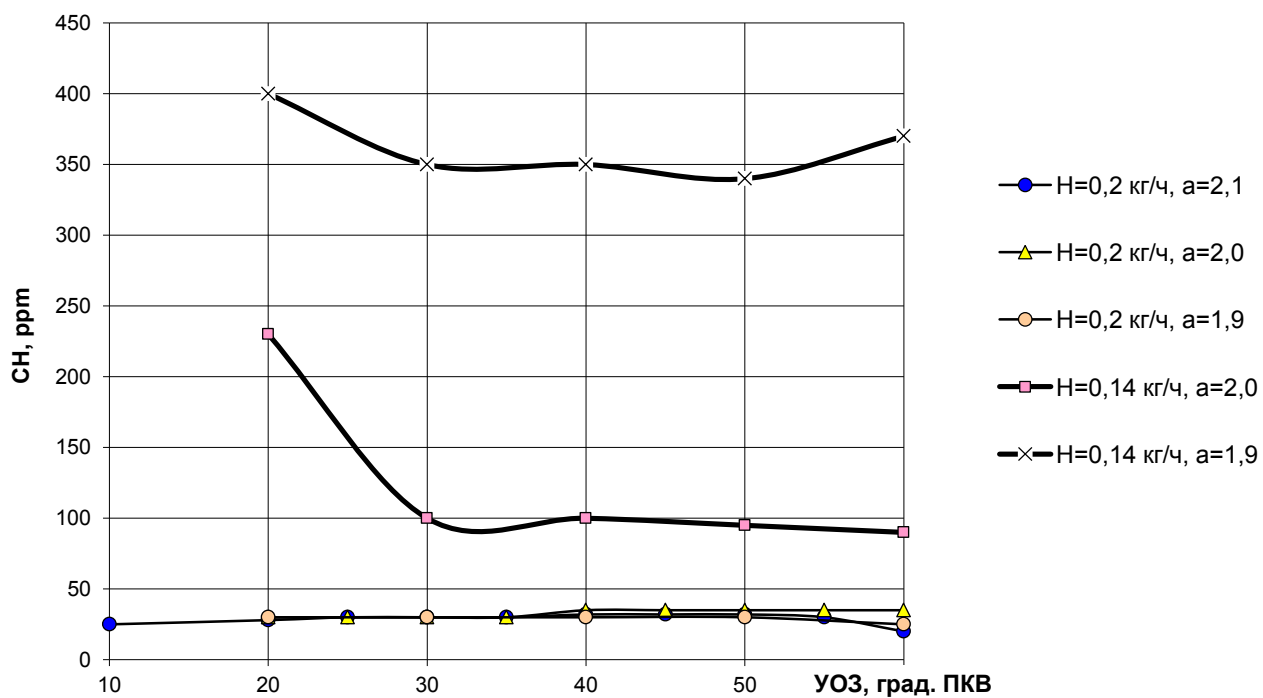


Рисунок А.4 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n = 2185$ об/мин; $P_e = 0,2$ МПа)

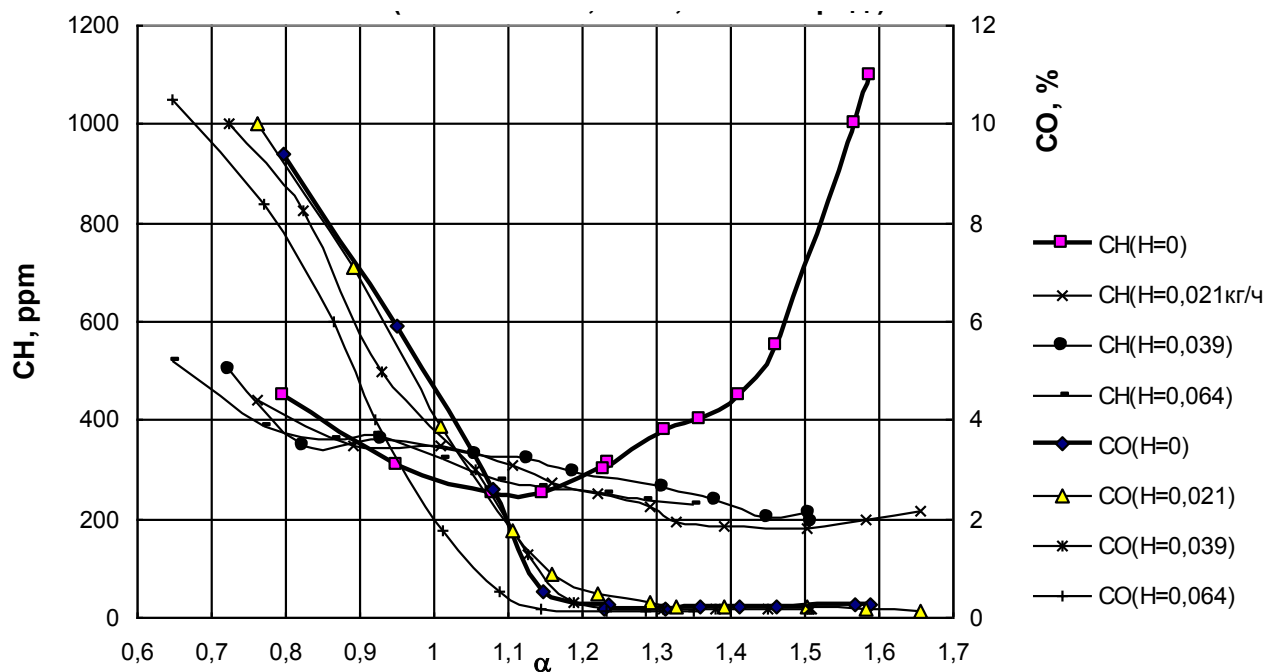


Рисунок А.5 – Изменение токсичности выбросов при подаче водорода

($n = 850$ об/мин, $P_e = 0$, УОЗ = 16 град. ПКВ)

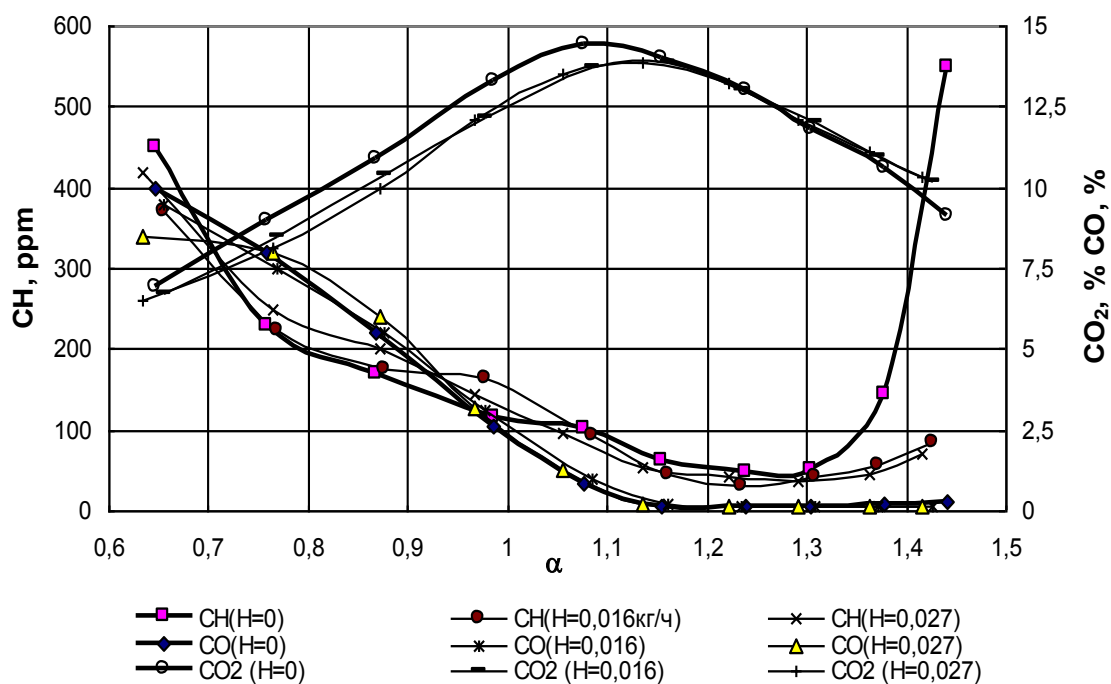


Рисунок А.6 – Регулировочная характеристика по составу смеси

($n = 2000$ об/мин, $Re = 0$, $G_H = var$, $УОЗ = 30$ град. ПКВ)

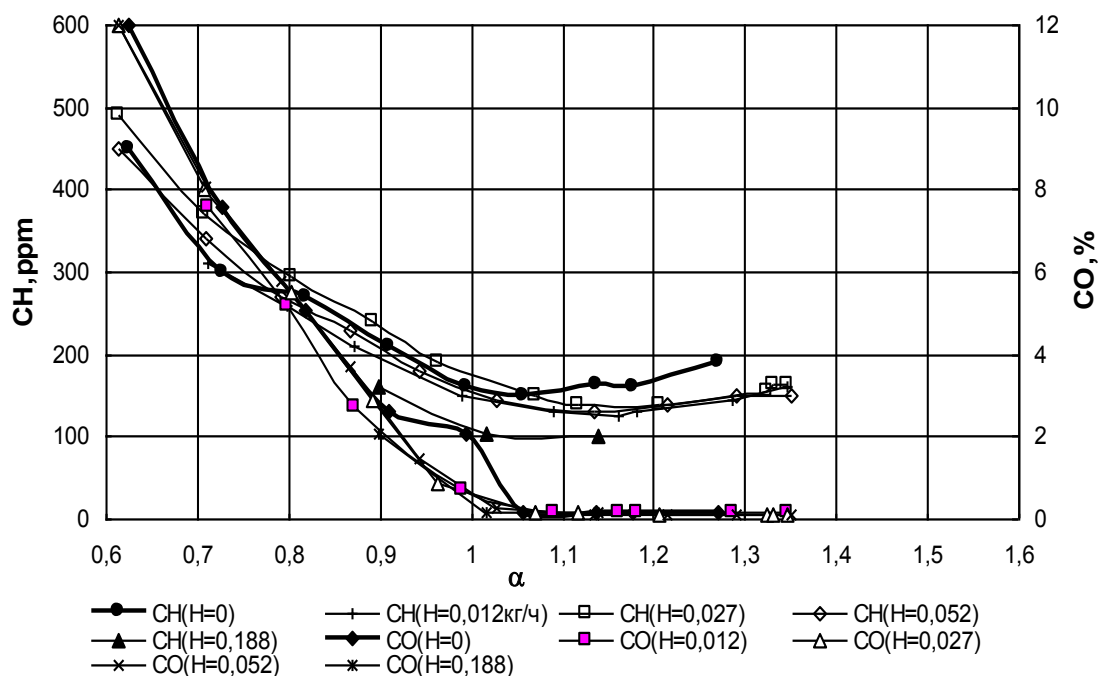


Рисунок А.7 – Регулировочная характеристика по составу смеси

($n = 2000$ об/мин, $Re = 0,2$ МПа, $УОЗ = \text{опт.}$)

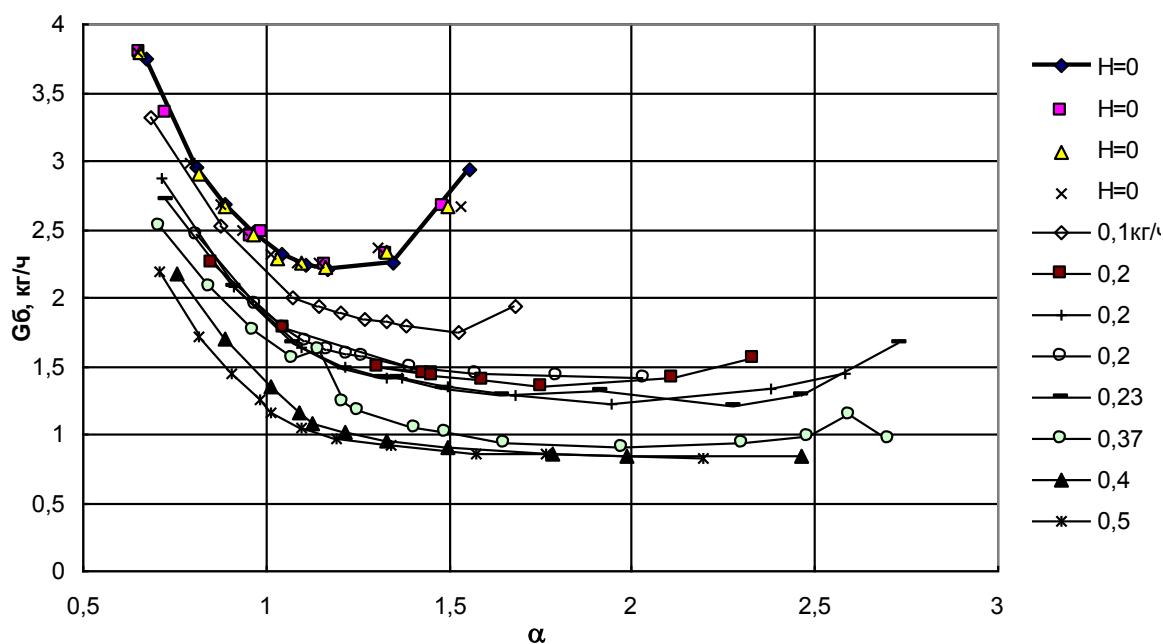


Рисунок А.8 – Регулировочная характеристика по составу смеси

($n = 2185$ об/мин, $P_e = 0,2$ МПа, УОЗ = опт.)

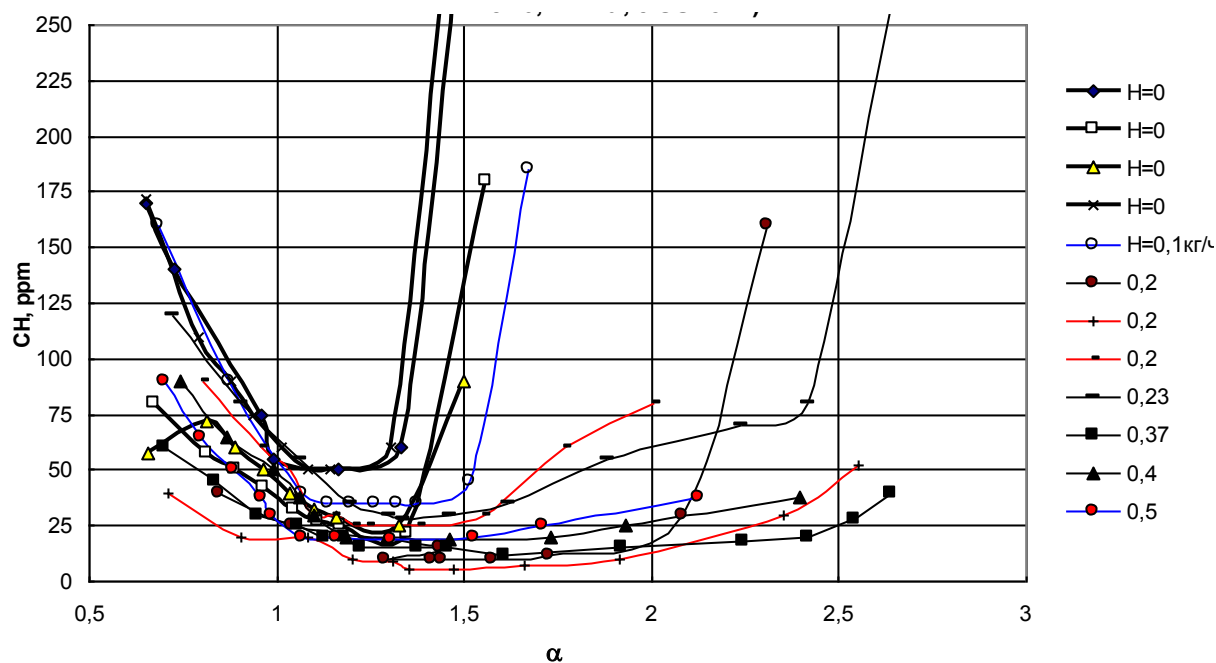


Рисунок А.9 – Регулировочная характеристика по составу смеси

($n = 2185$ об/мин, $P_e = 0,2$ МПа, УОЗ = опт.)

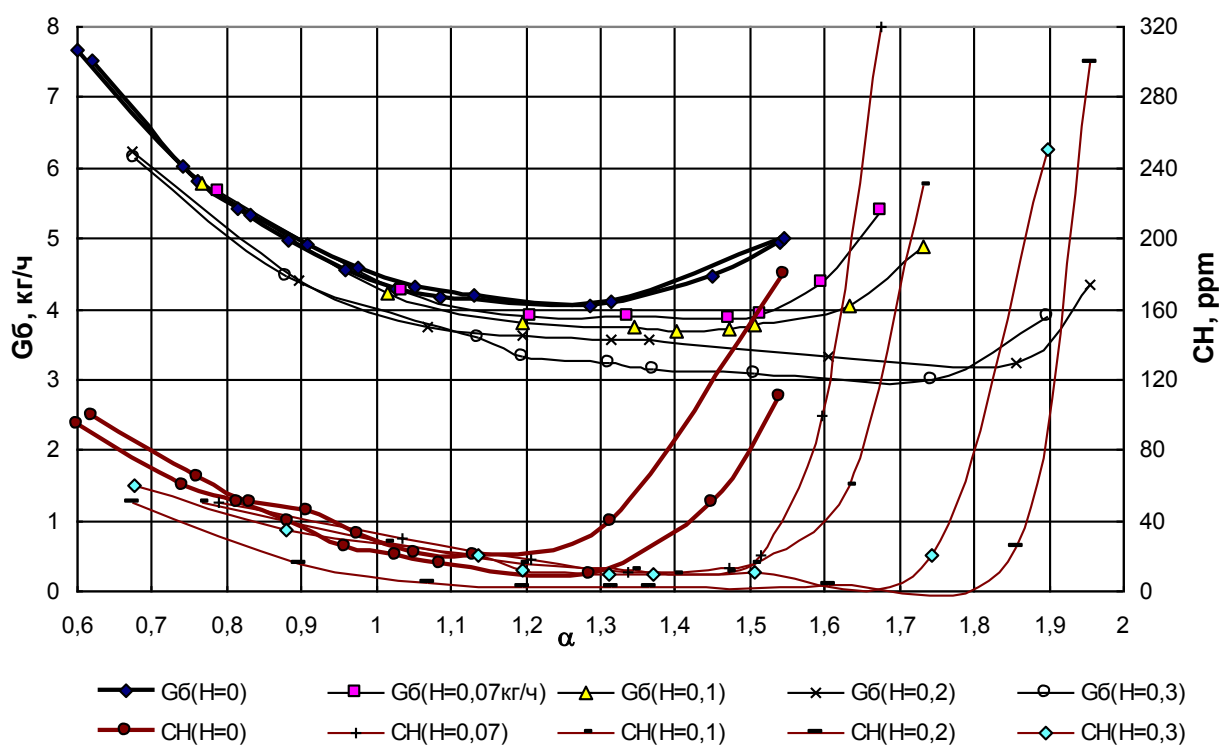


Рисунок А.10 – Регулировочная характеристика по составу смеси

($n = 3170$ об/мин, $P_e = 0,33$ МПа, УОЗ = опт.)

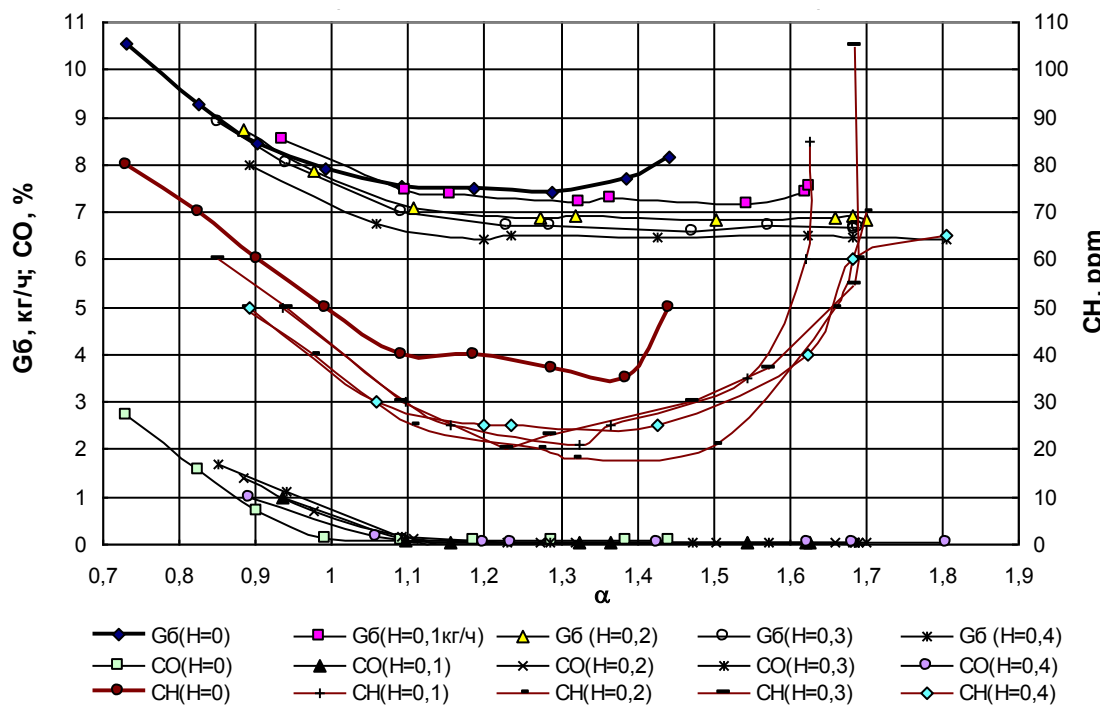


Рисунок А.11 – Регулировочная характеристика по составу смеси

($n = 4370$ об/мин, $P_e = 0,5$ МПа, УОЗ = опт.)

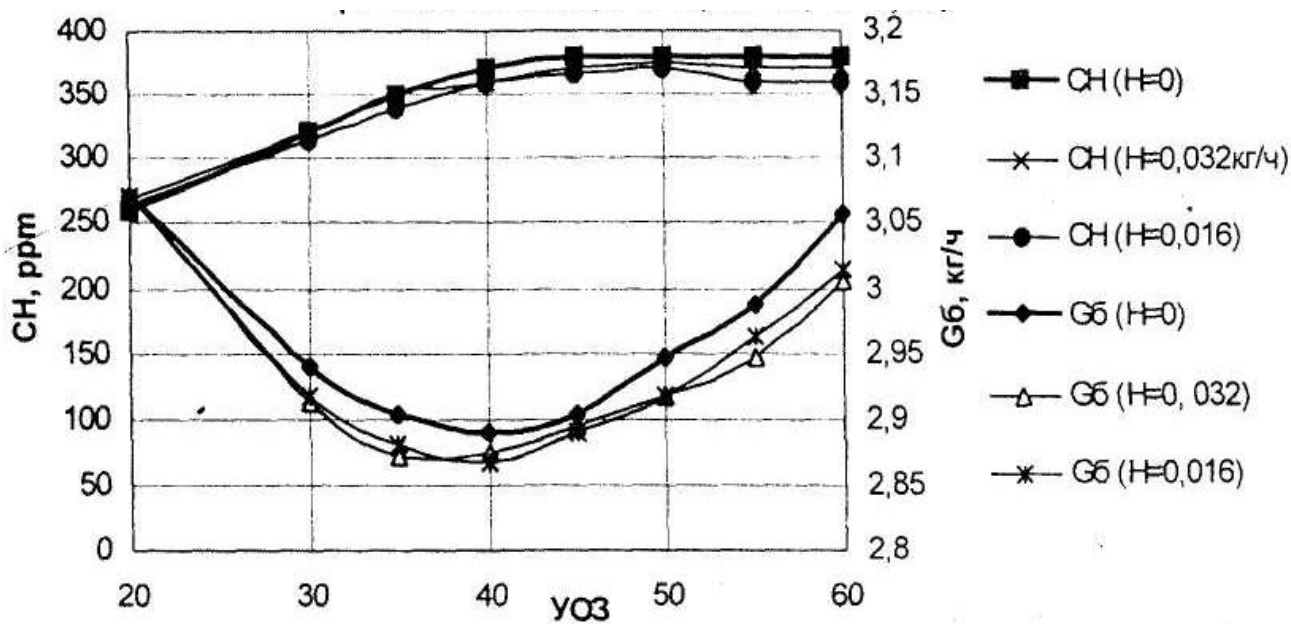


Рисунок А.12 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $P_e=0,2$ МПа, $\alpha=0,72$)

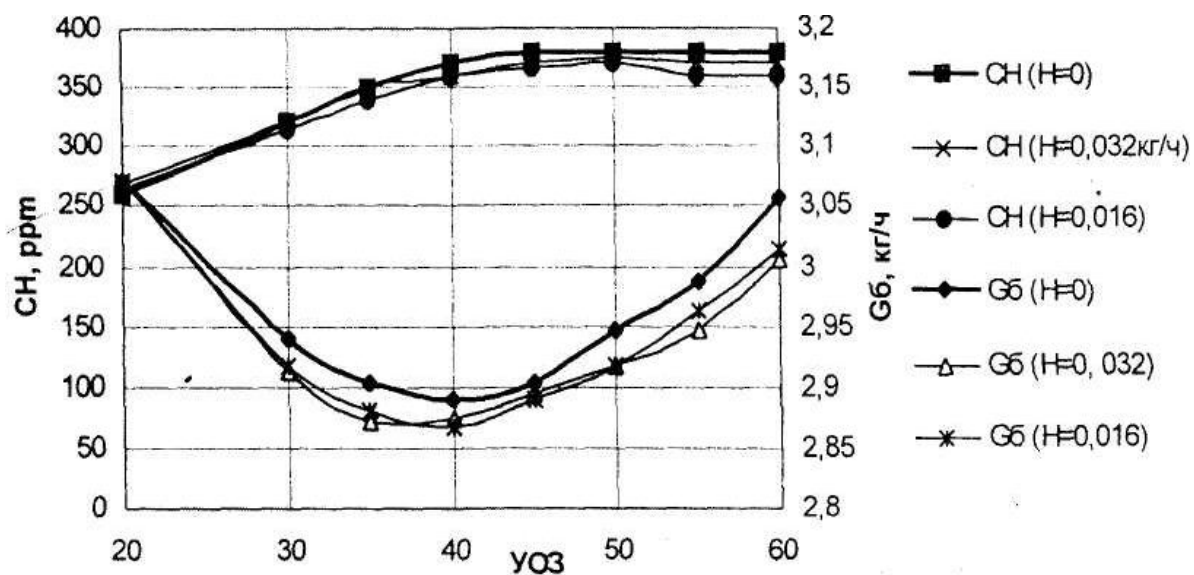


Рисунок А.13 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $P_e=0,2$ МПа, $\alpha=0,72$)

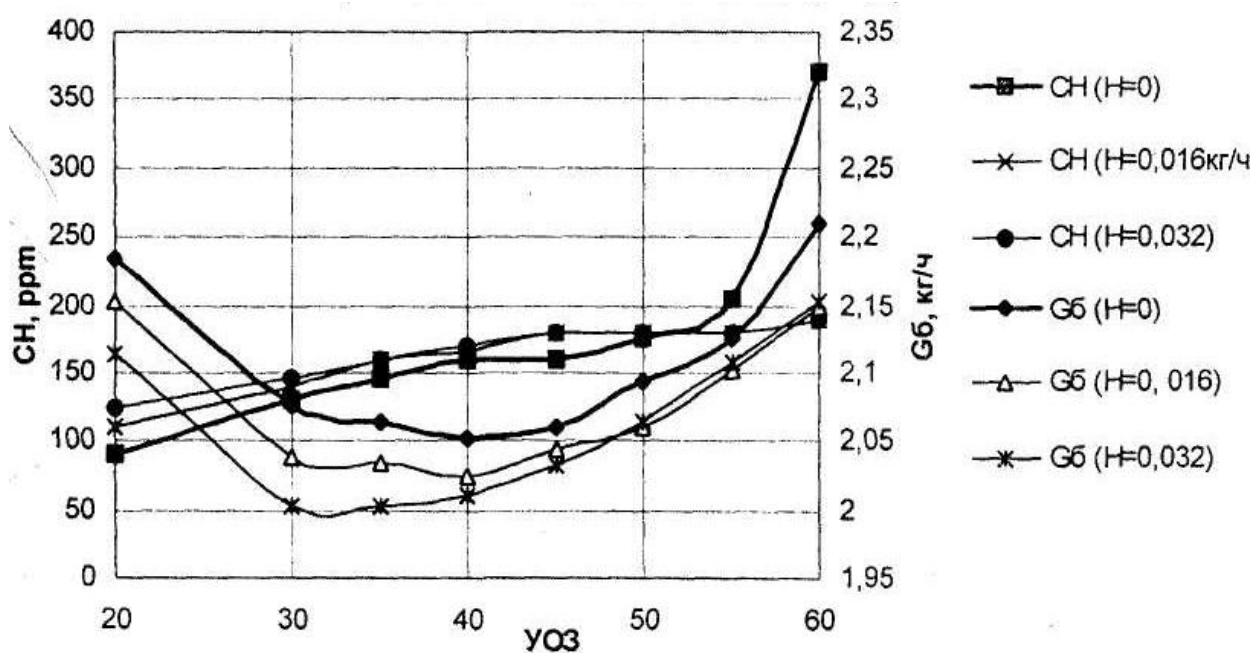


Рисунок А.14 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $Pe=0,2$ МПа, $\alpha=1,0$)

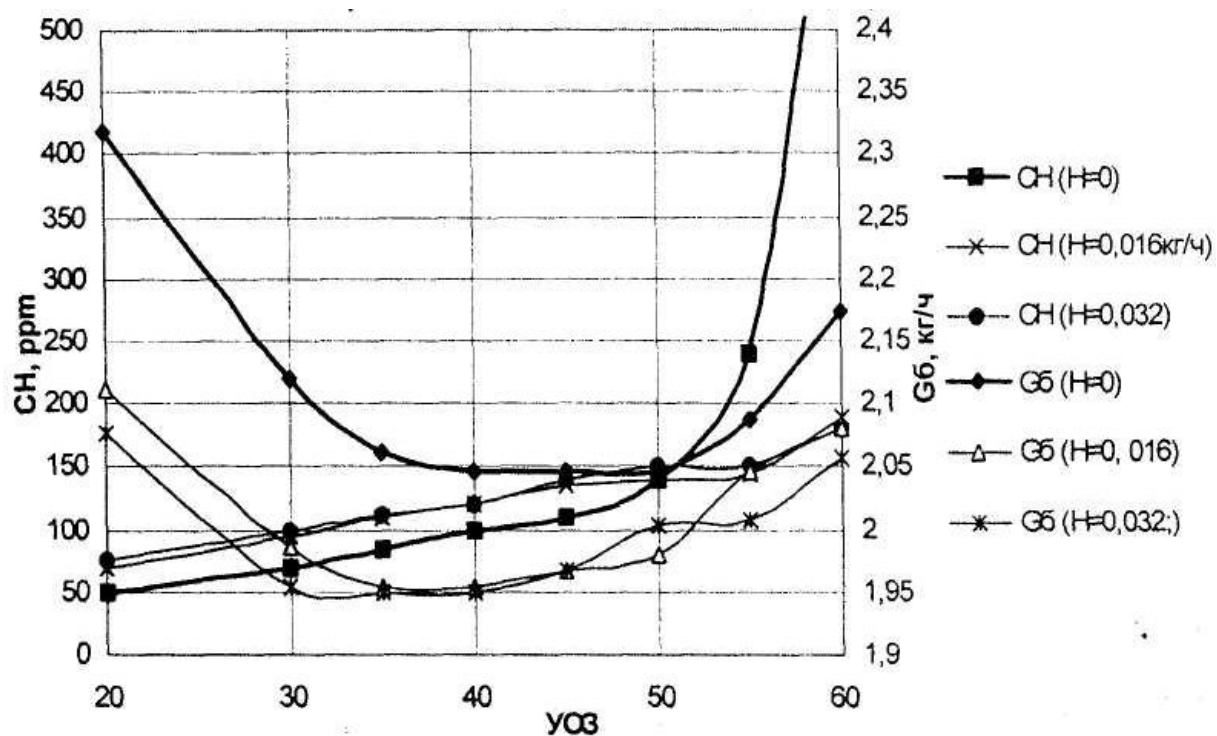


Рисунок А.15 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $Pe=0,2$ МПа, $\alpha=1,05$)

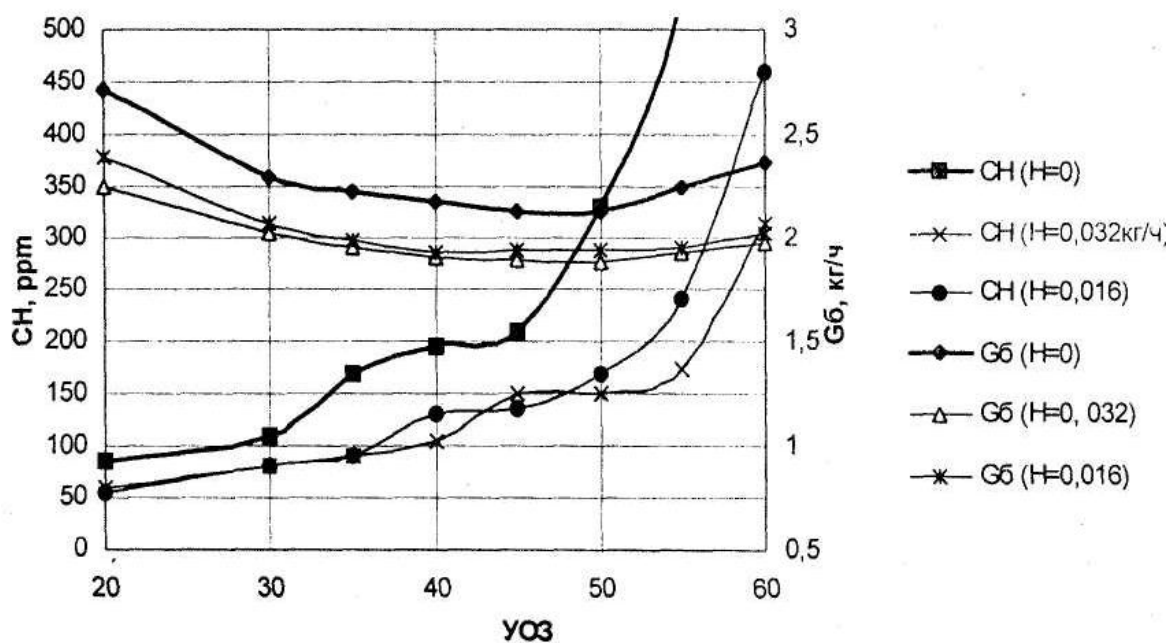


Рисунок А.16 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $P_e=0,2$ МПа, $\alpha=1,31$)

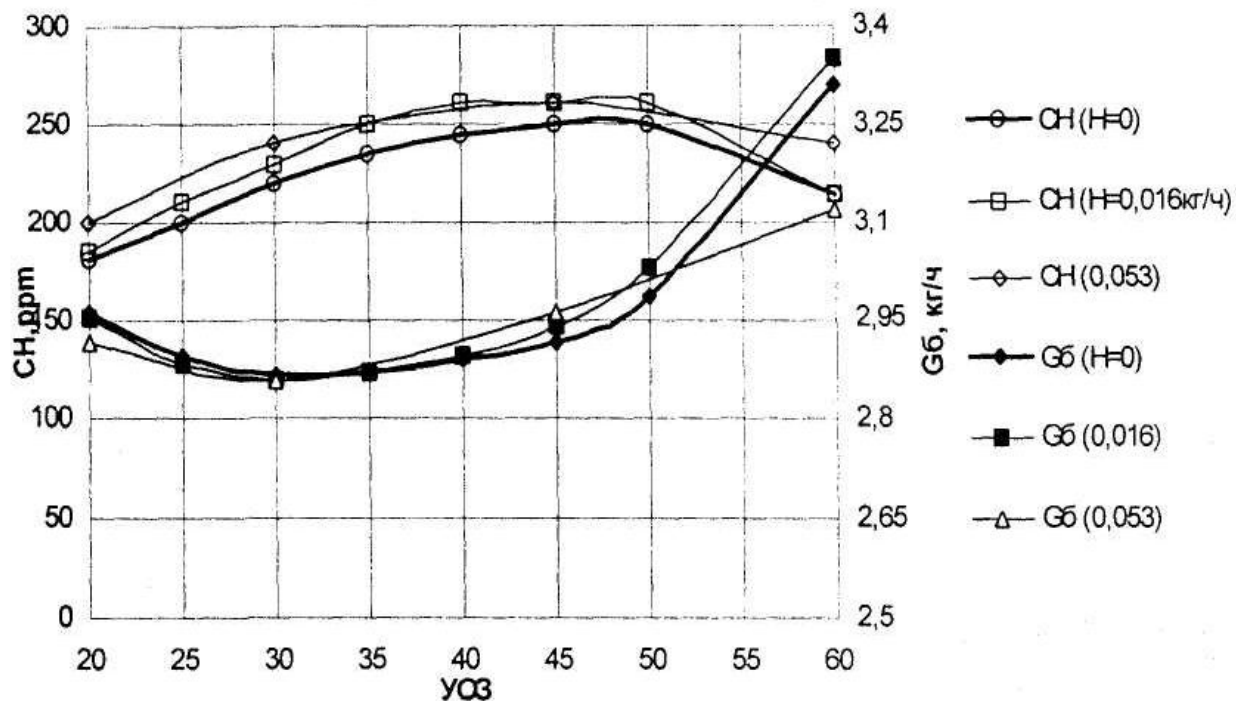


Рисунок А.17 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $P_e=0,2$ МПа, $\alpha=0,88$)

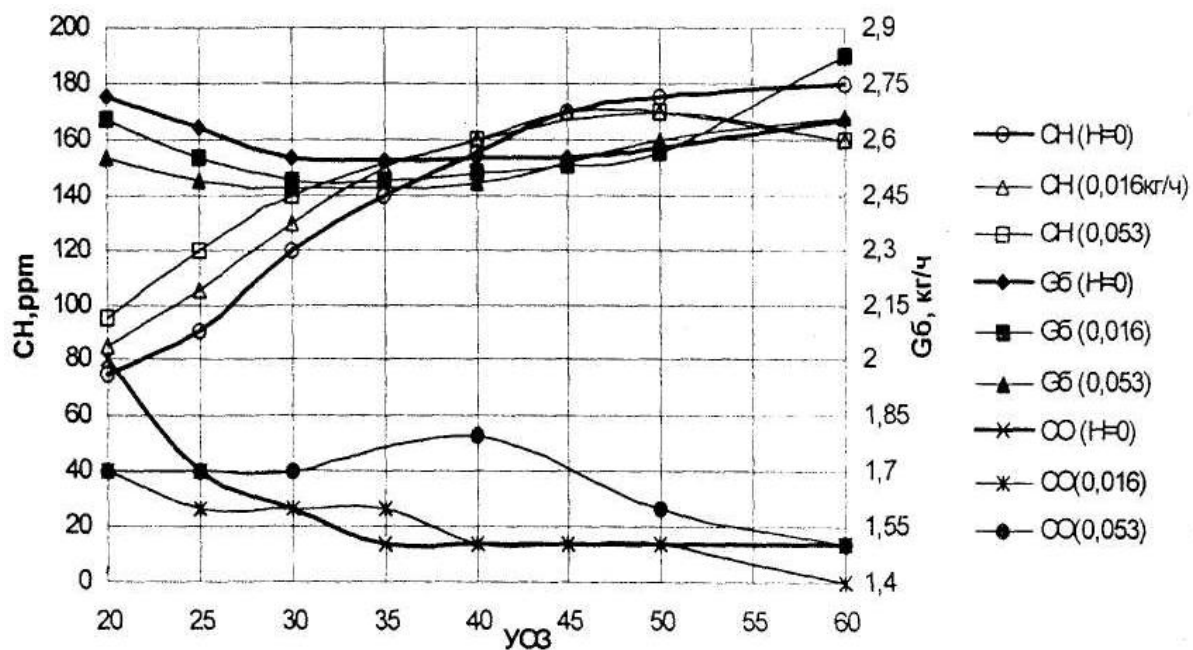


Рисунок А.18 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $P_e=0,3$ МПа, $\alpha=1,05$)

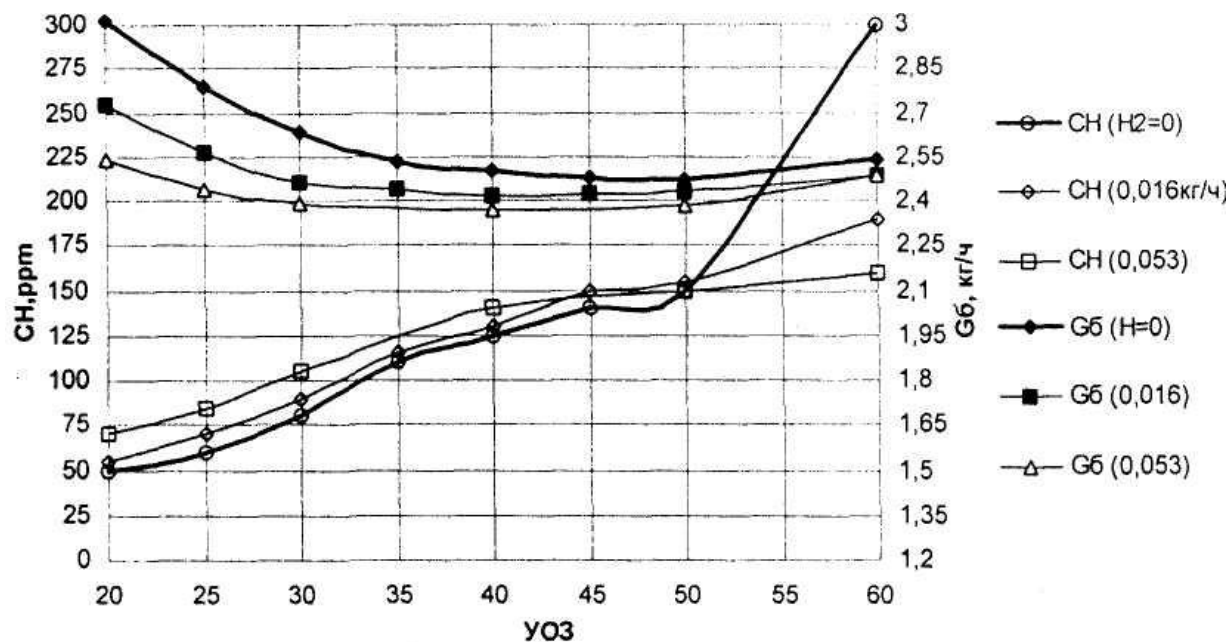


Рисунок А.19 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $P_e=0,3$ МПа, $\alpha=1,19$)

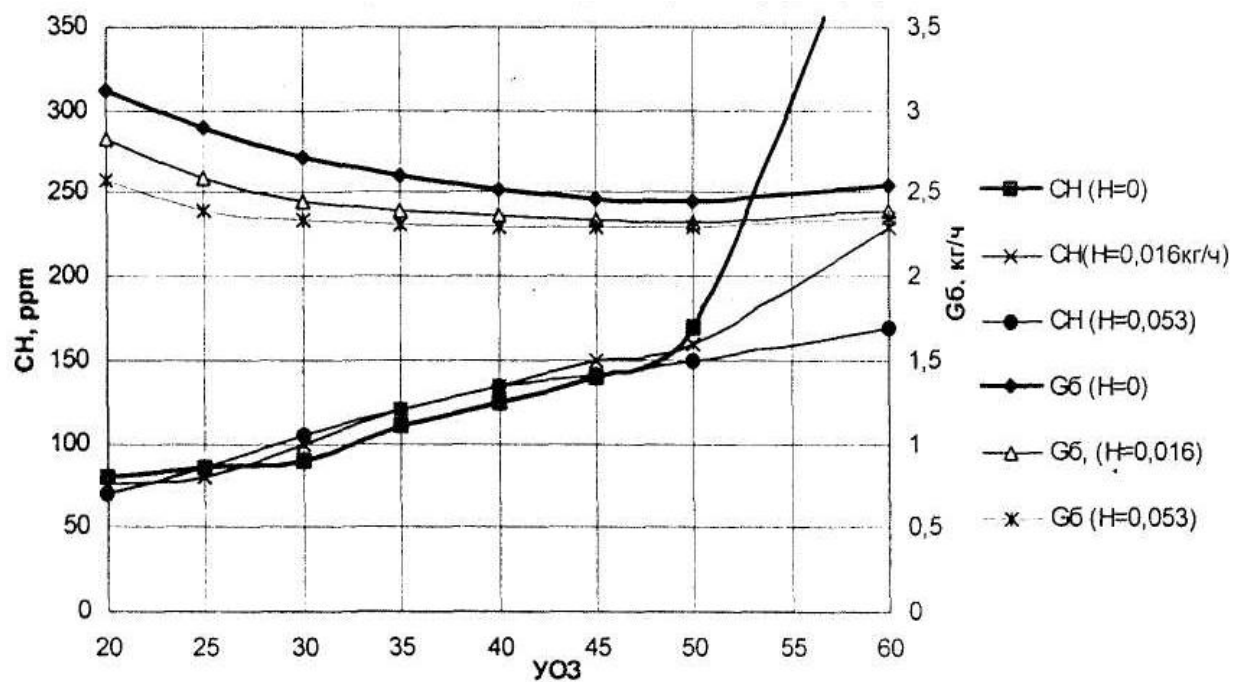


Рисунок А.20 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $P_e=0,3$ МПа, $\alpha=1,26$)

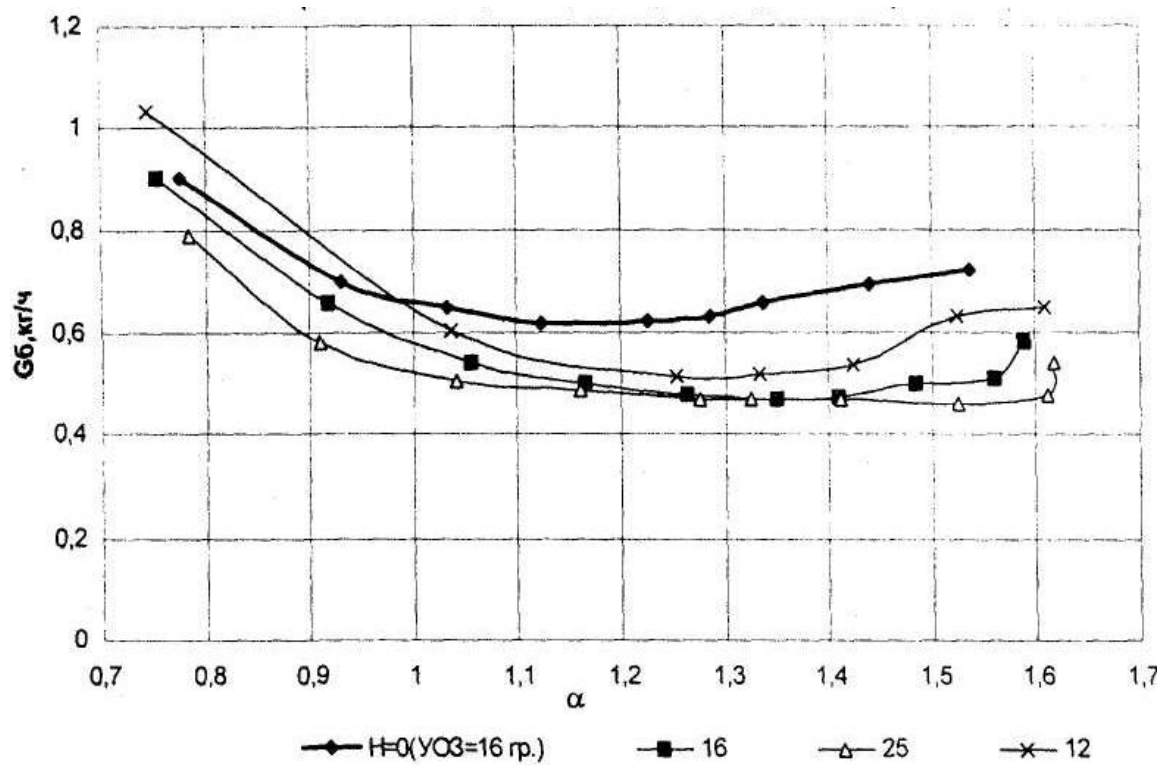


Рисунок А.21 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=850$ об/мин, $P_e=0$ МПа, $G_H=0,013$, УОЗ=var)

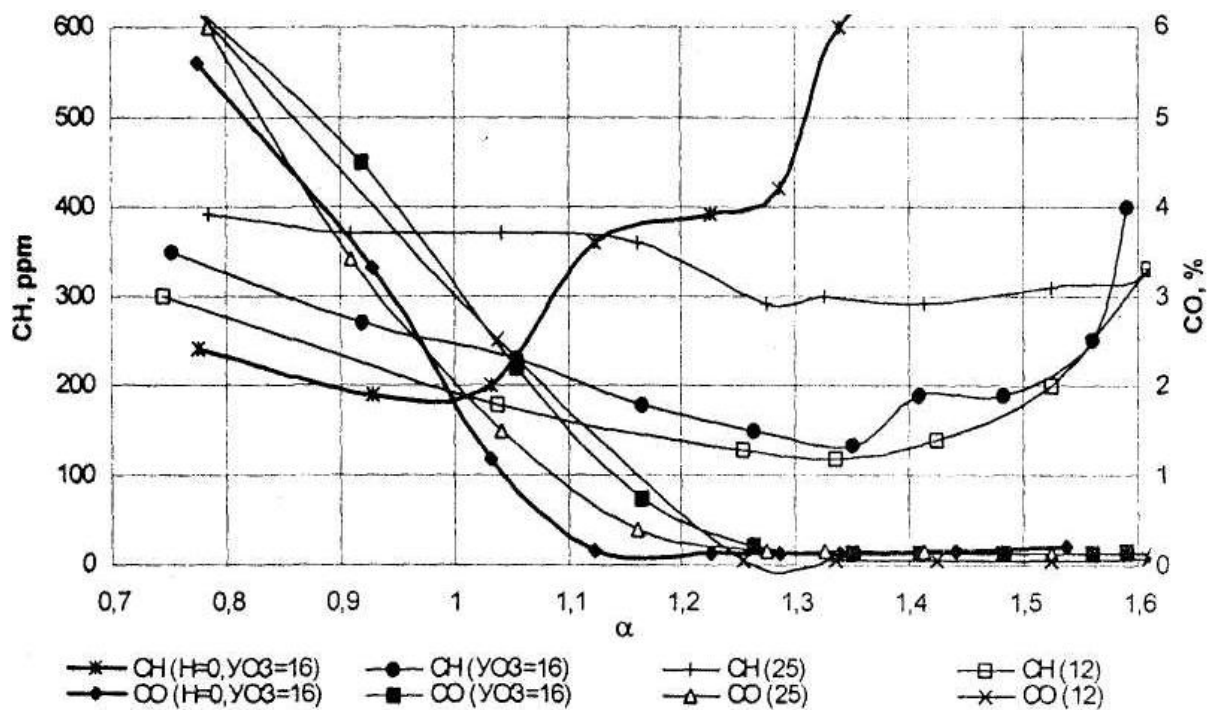


Рисунок А.22 –Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=850\text{об/мин}$, $P_e=0\text{МПа}$, $G_H=0,013$, $\text{УОЗ}=\text{var}$)

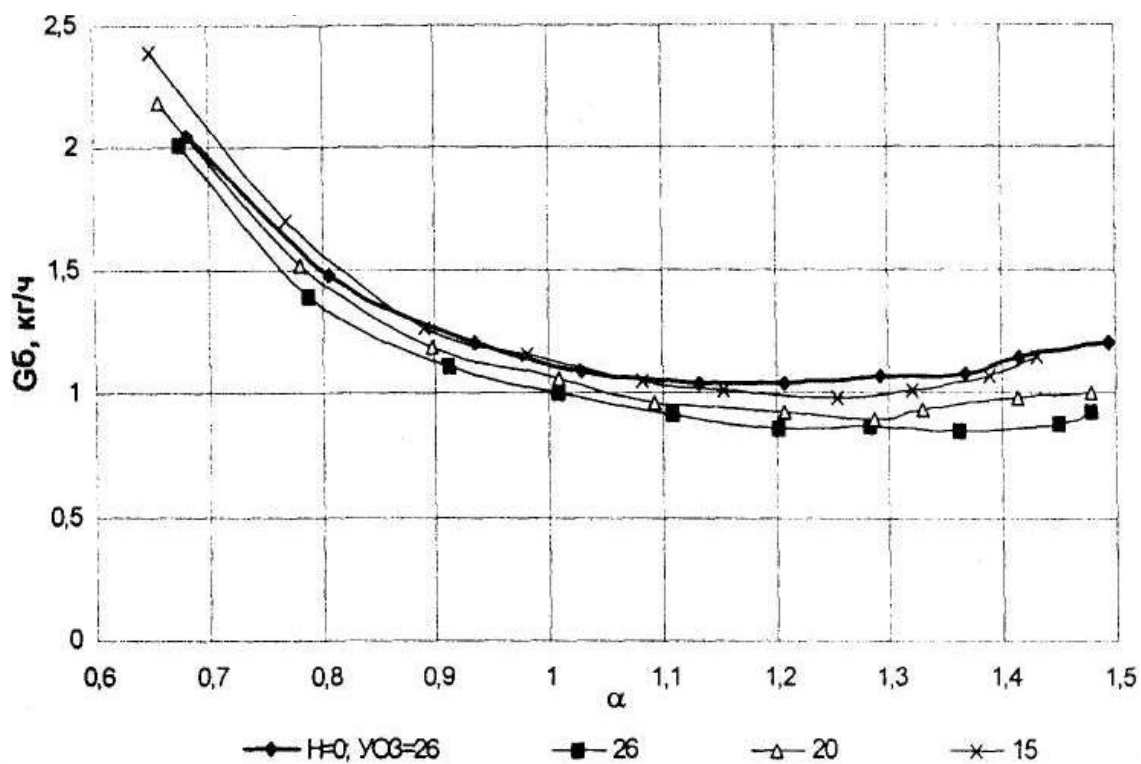


Рисунок А.23 –Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=850 \text{ об/мин}$, $P_e=0 \text{ МПа}$, $G_H=0,016$, $УОЗ=\text{var}$)

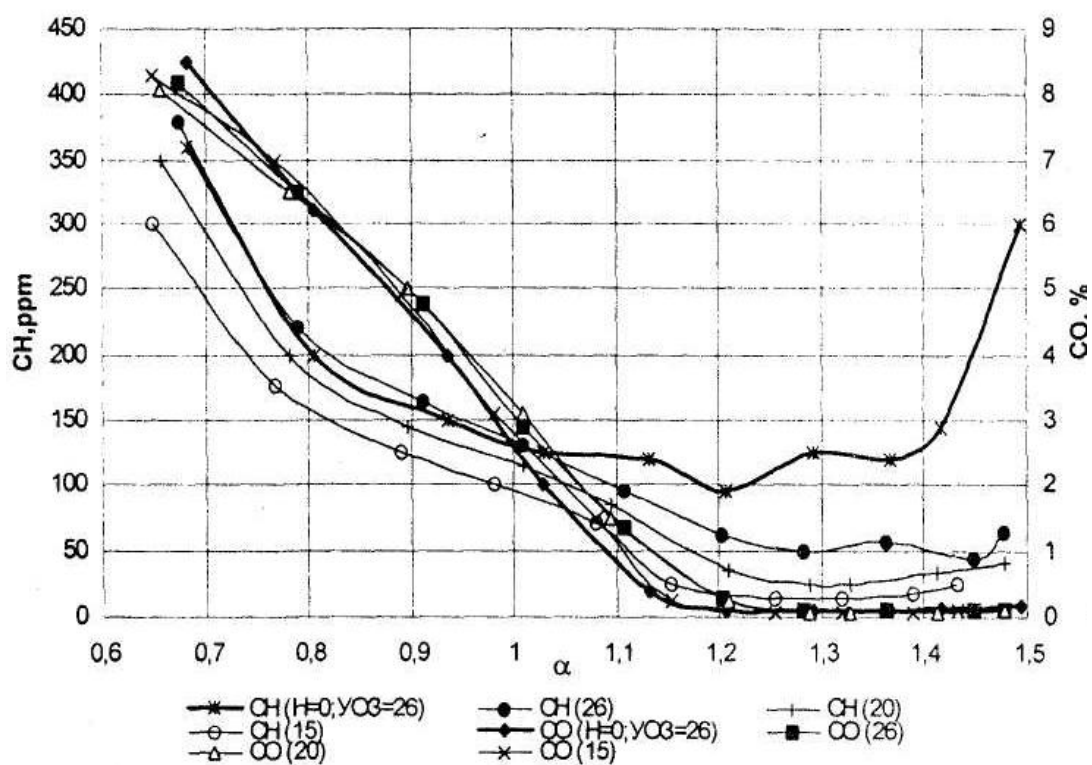


Рисунок А.24 –Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=850 \text{ об/мин}$, $P_e=0 \text{ МПа}$, $G_H=0,016$, $УОЗ=\text{var}$)

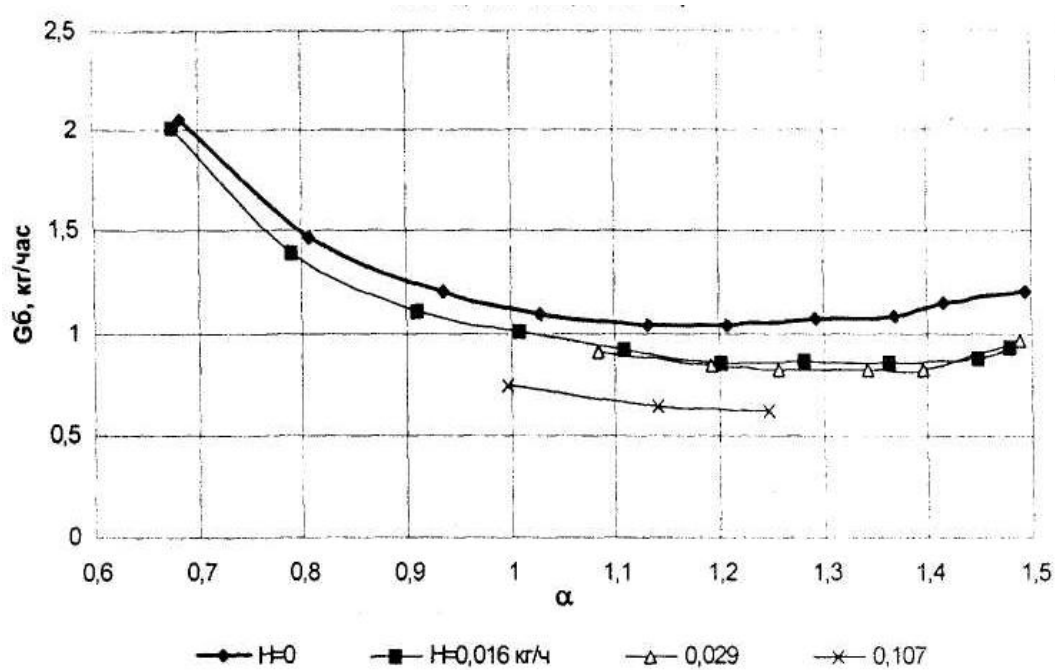


Рисунок А.25 –Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=850$ об/мин, $P_e=0$ МПа, $G_H=var$, УОЗ=26)

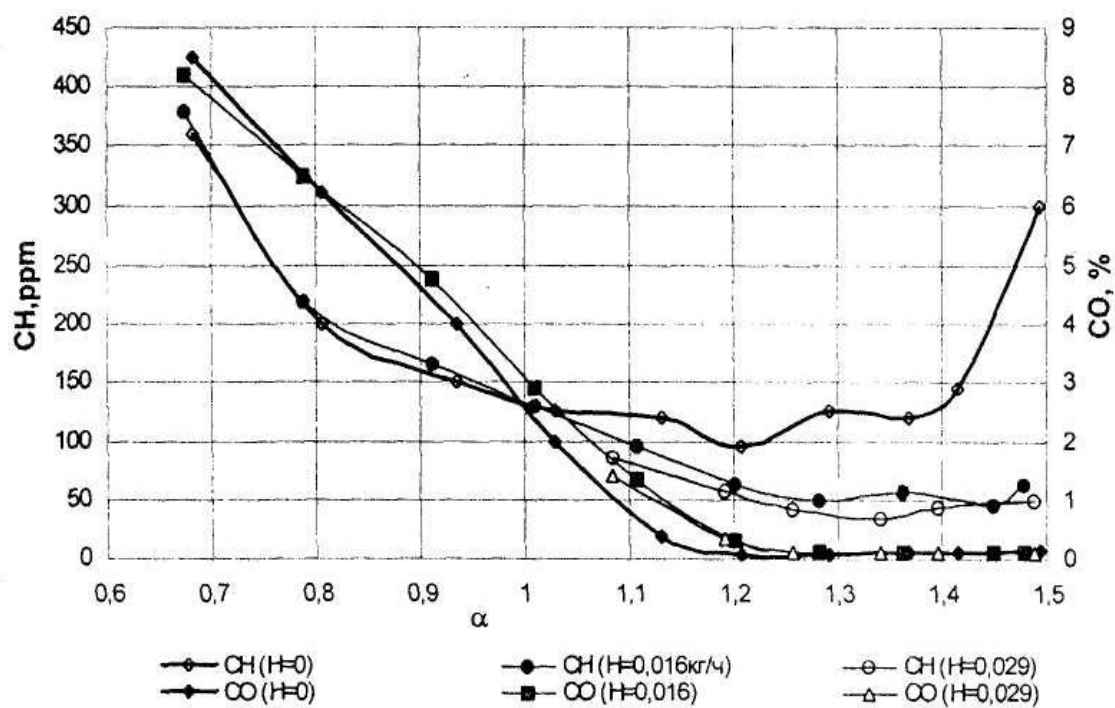


Рисунок А.26 –Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=850$ об/мин, $P_e=0$ МПа, $G_H=var$, УОЗ=26)

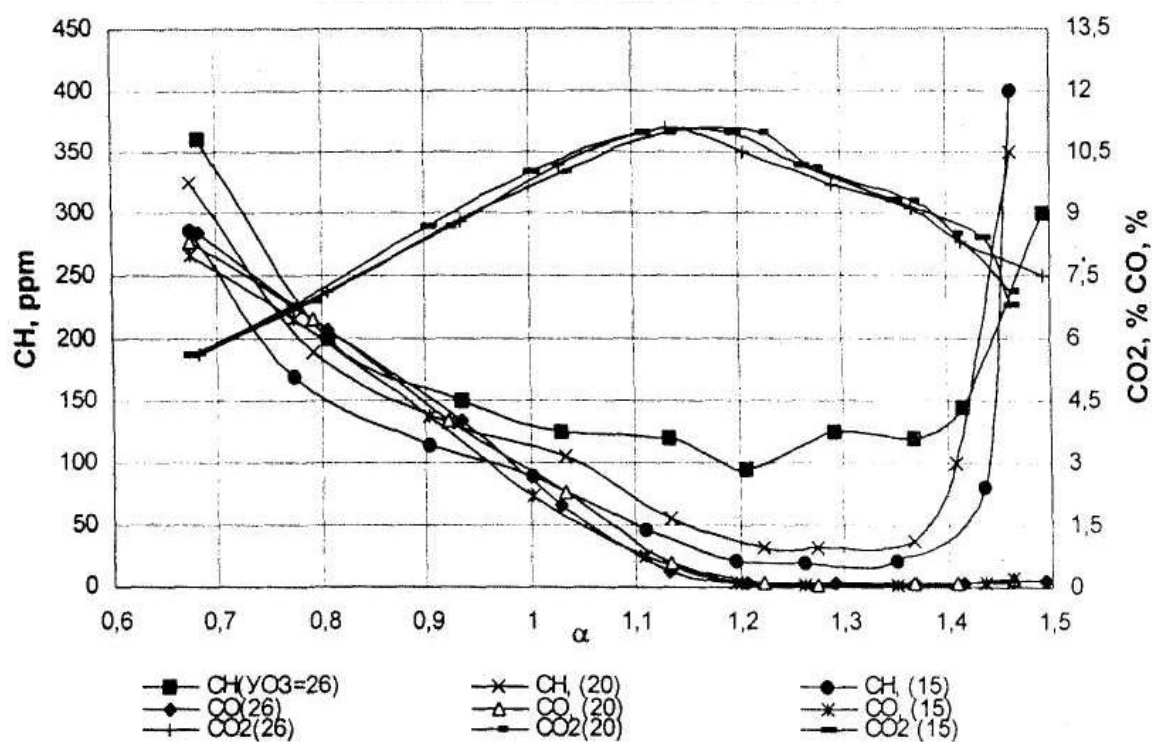


Рисунок А.27 – Влияние Y_{O_3} и коэффициента избытка воздуха на состав ОГ
($n=1500$ об/мин, $P_e=0$ МПа, $G_H=0$)

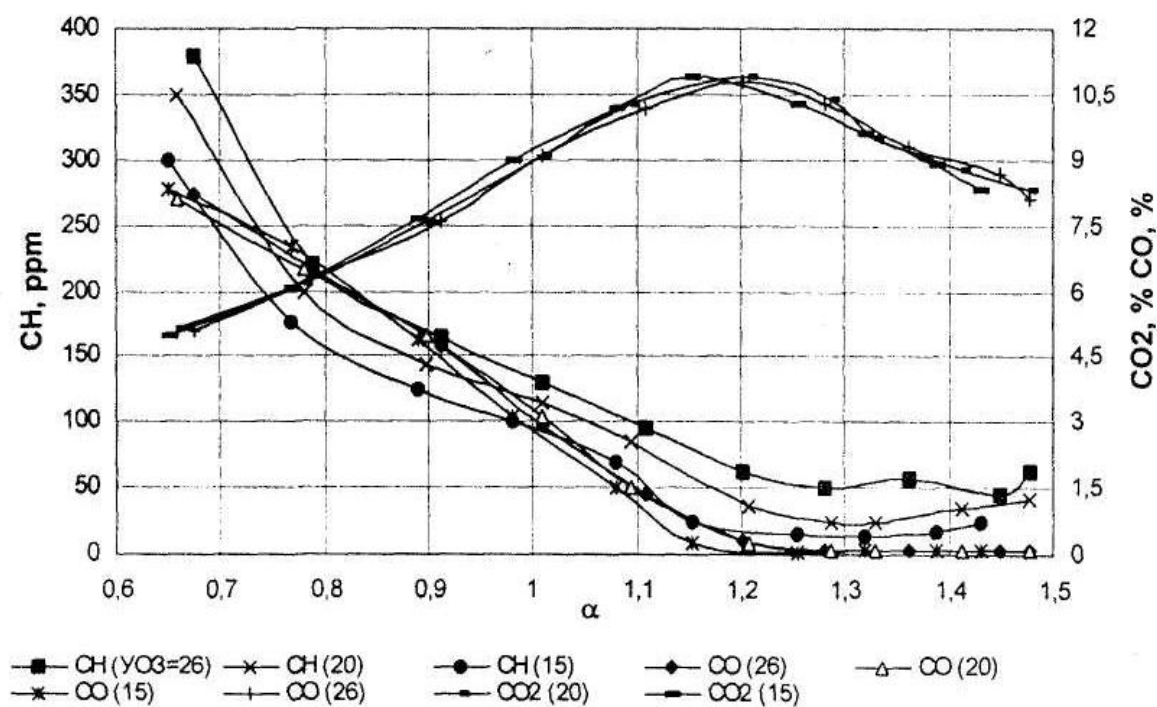


Рисунок А.28 – Влияние УОЗ и коэффициента избытка воздуха на состав ОГ
при подаче водорода ($n=1500$ об/мин, $P_e=0$ МПа, $G_H=0,016$)

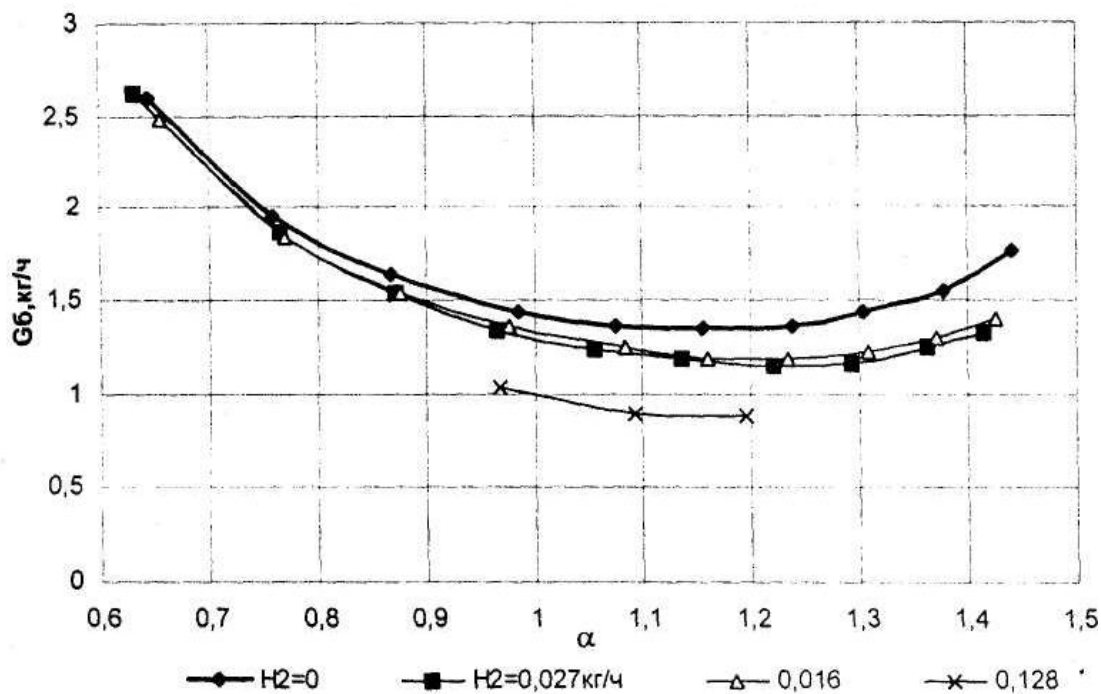


Рисунок А.29 – Регулировочная характеристика по УОЗ
($n=2000$ об/мин, $P_e=0$ МПа, УОЗ=30)

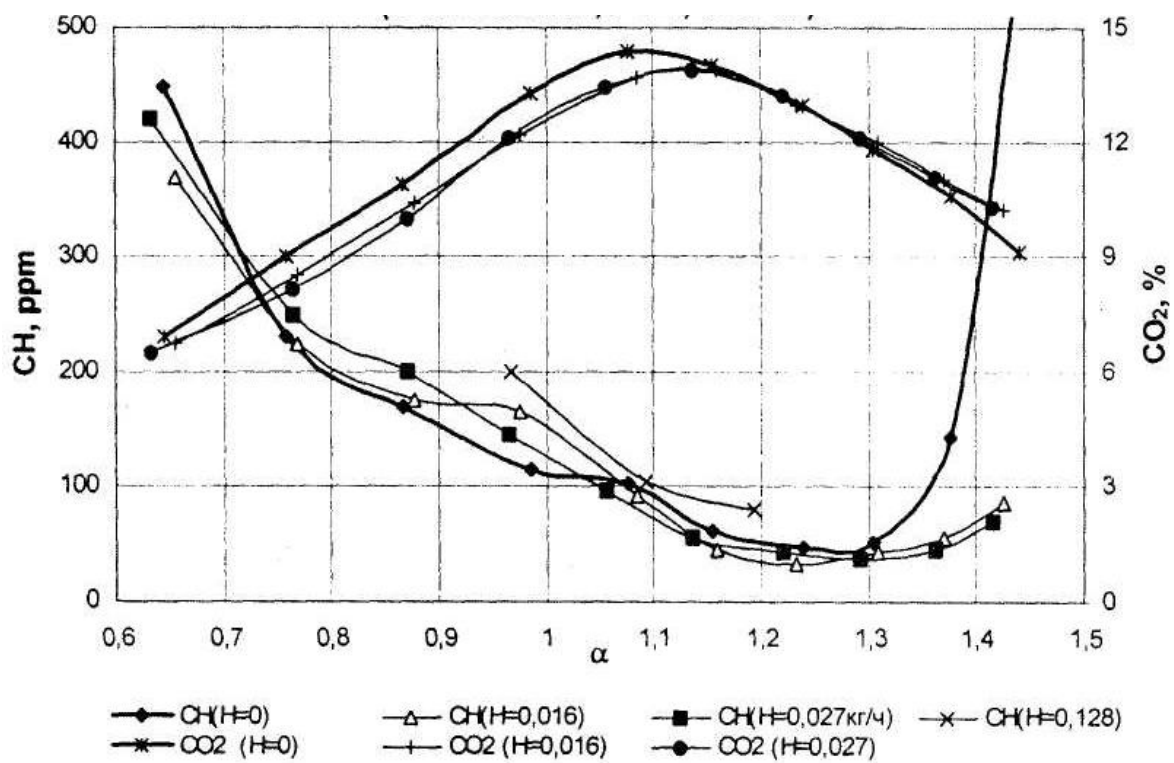


Рисунок А.30 – Регулировочная характеристика по УОЗ

($n=2000$ об/мин, $P_e=0$ МПа, УОЗ=30)

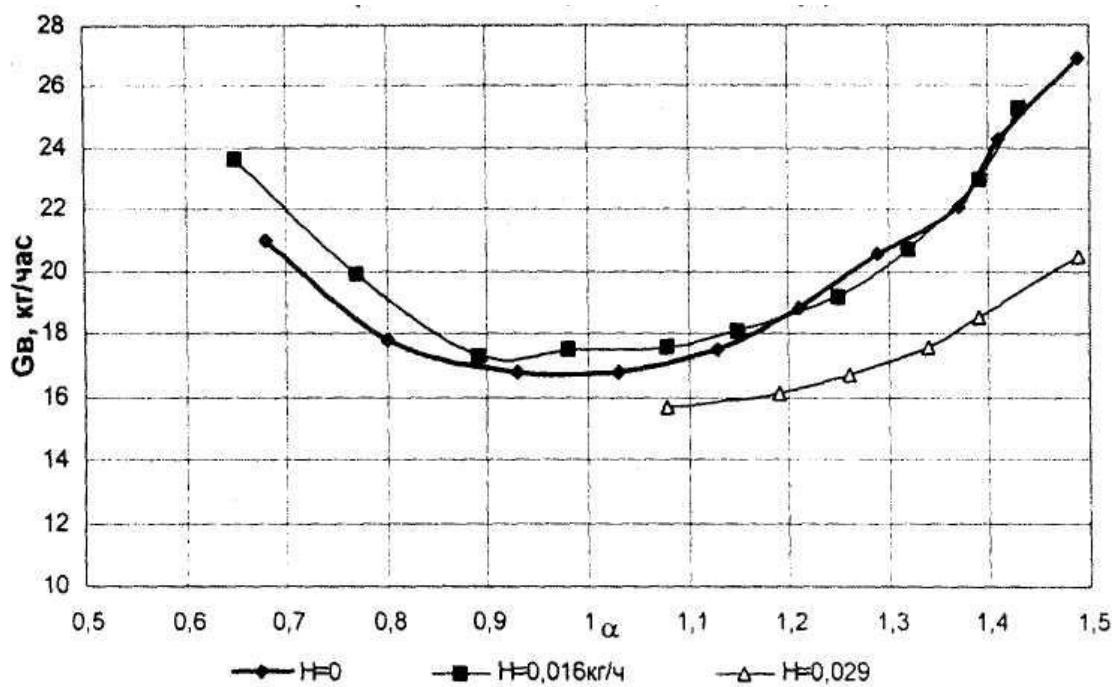


Рисунок А.31 – Изменение расхода воздуха при подаче водорода

($n=1500$ об/мин, $N_e=0$ кВт, $УОЗ=26$)

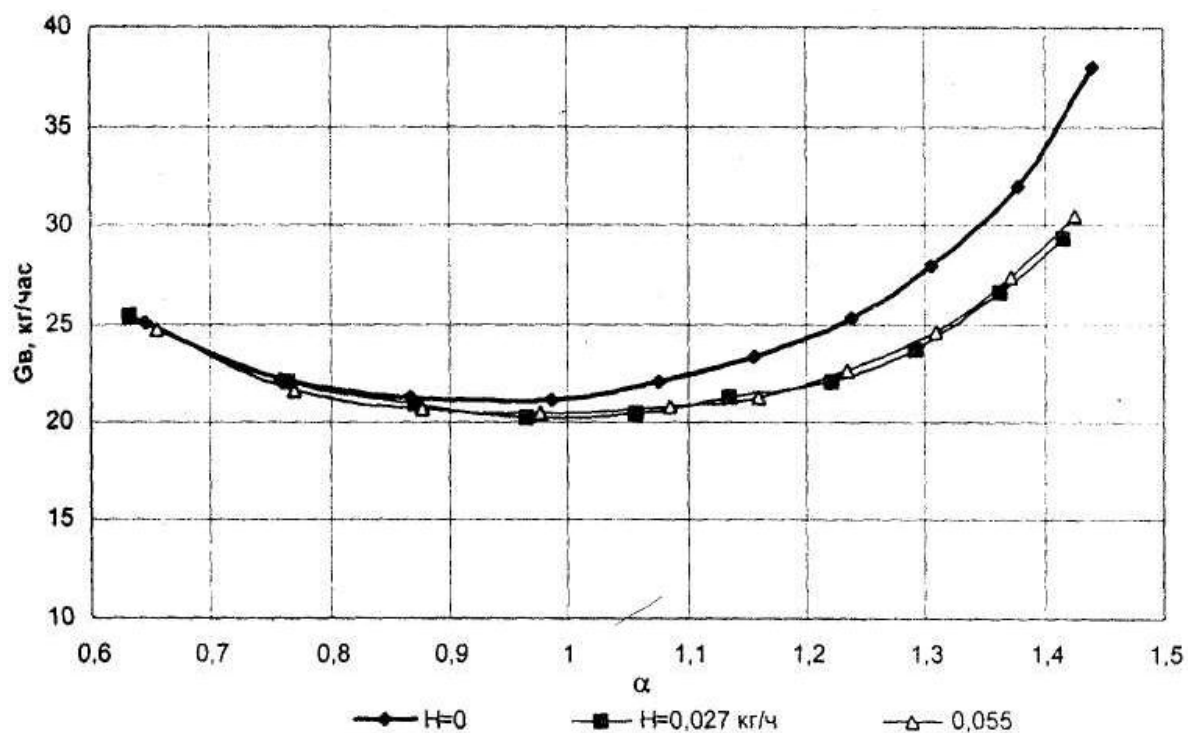


Рисунок А.32 – Изменение расхода воздуха при подаче водорода

($n=2000$ об/мин, $N_e=0$ кВт, $УОЗ=26$)

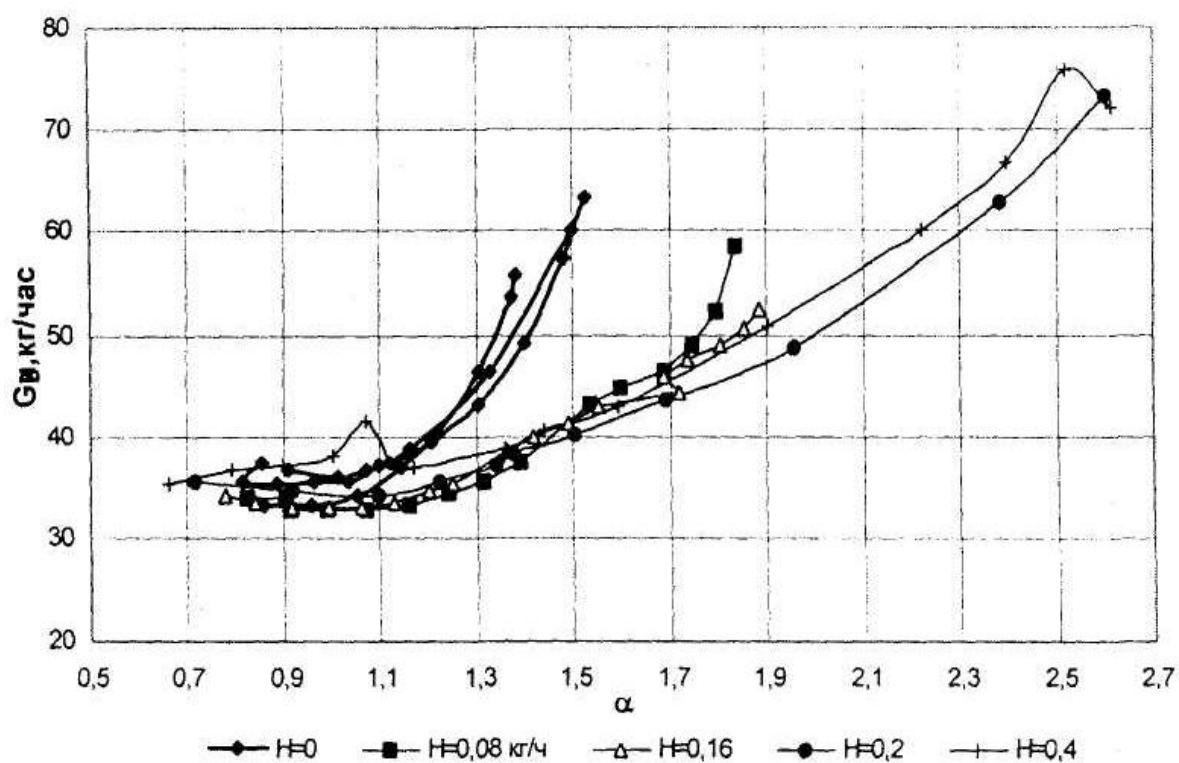


Рисунок А.33 – Изменение расхода воздуха при подаче водорода

($n=2185$ об/мин, $P_e=0,2$ МПа, $УОЗ=опт.$)

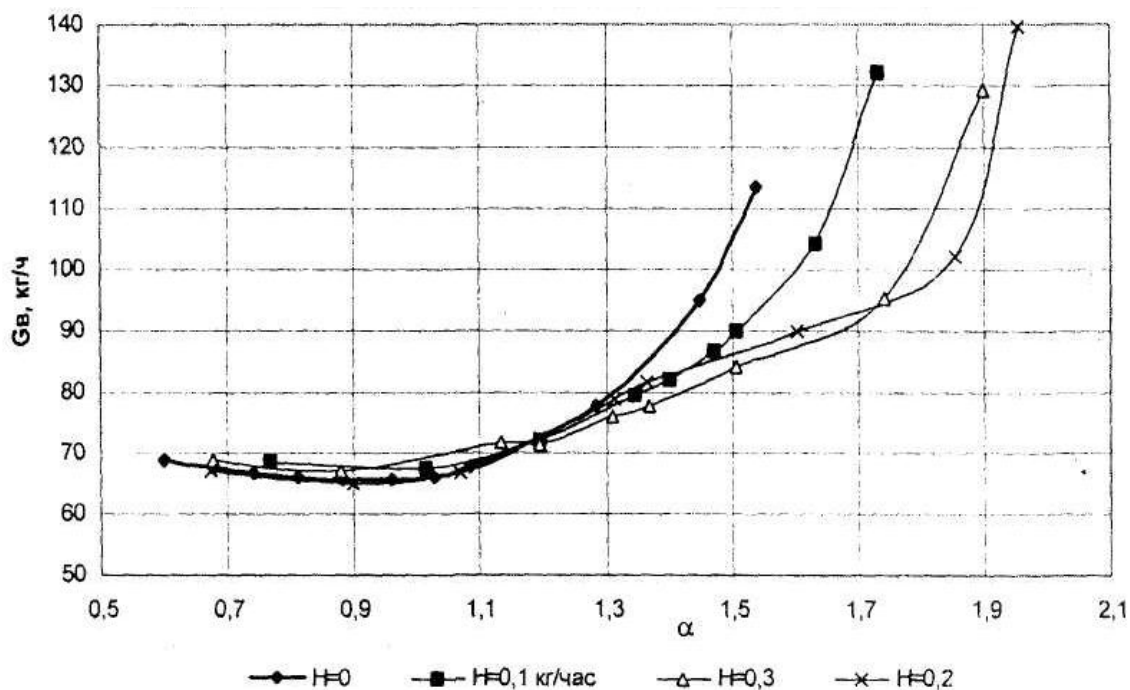


Рисунок А.34 – Изменение расхода воздуха ($n=3277$ об/мин, $P_e=0,33$ МПа,

$УОЗ=опт.$)

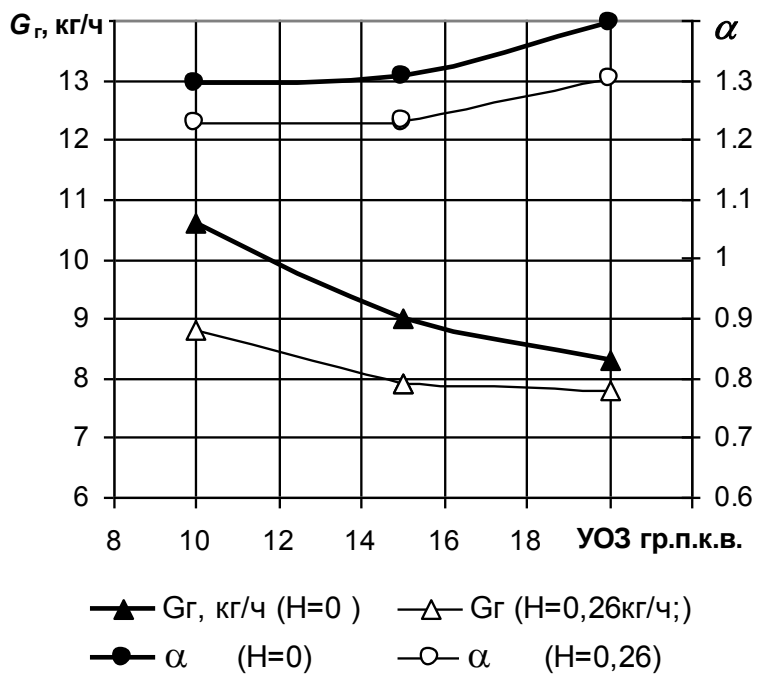


Рисунок А.35 –Регулировочная характеристика по УОЗ ($n = 1500$ мин-1, $P_e = 1,46$ кг/см²).

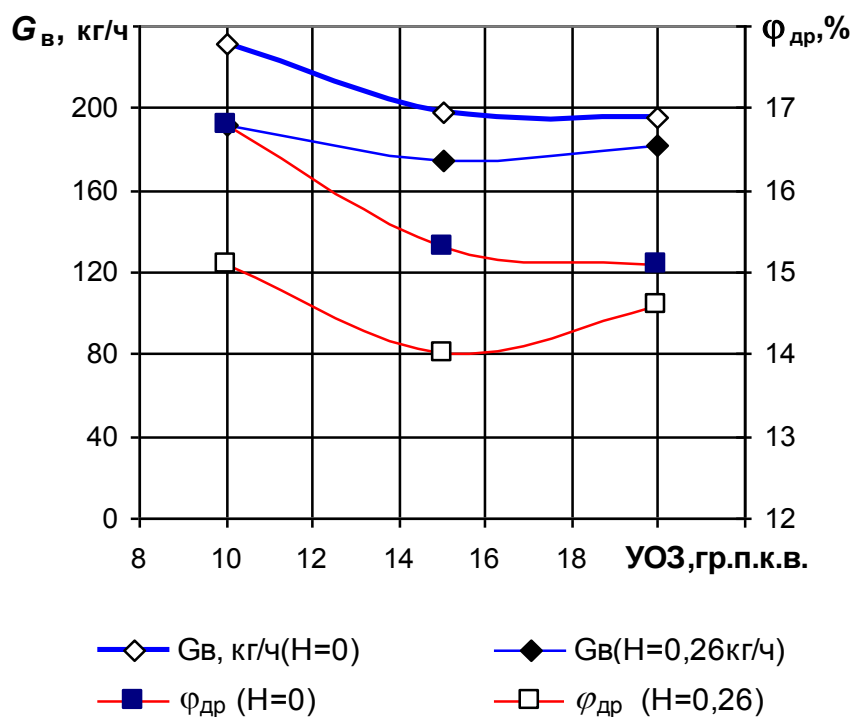


Рисунок А.36 –Регулировочная характеристика по УОЗ
($n = 1500$ мин-1, $P_e = 1,46$ кг/см²).

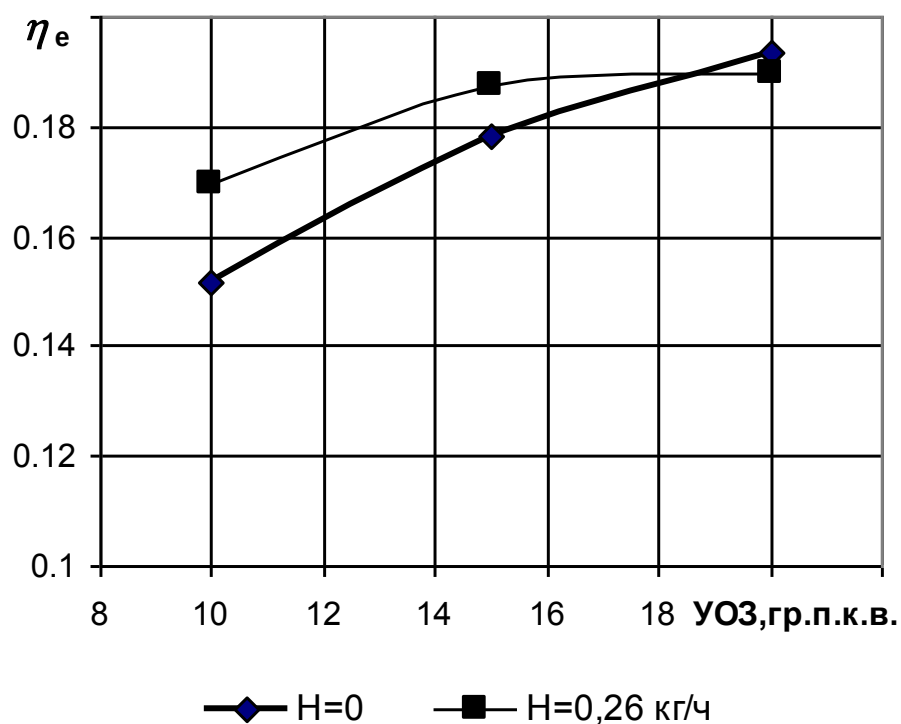


Рисунок А.37 –Изменение эффективного КПД по УОЗ

($n = 1500$ мин-1, $P_e = 1,46$ кг/см²).

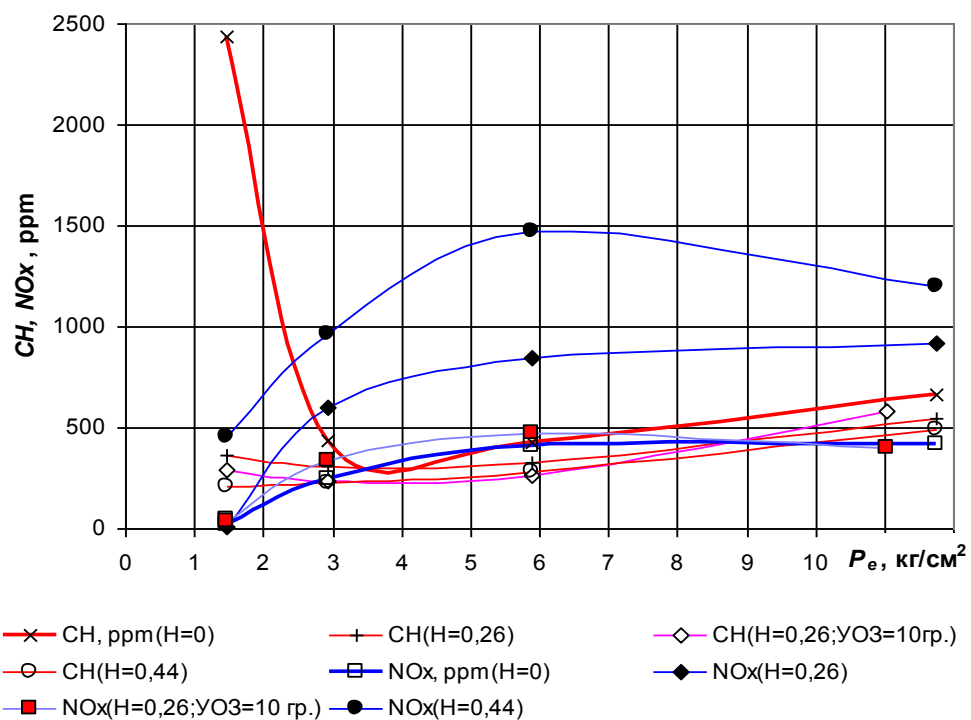


Рисунок А.38 –Нагрузочная характеристика ($n = 1500$ мин-1, $P_e = 1,46$ кг/ч,
УОЗ = var)

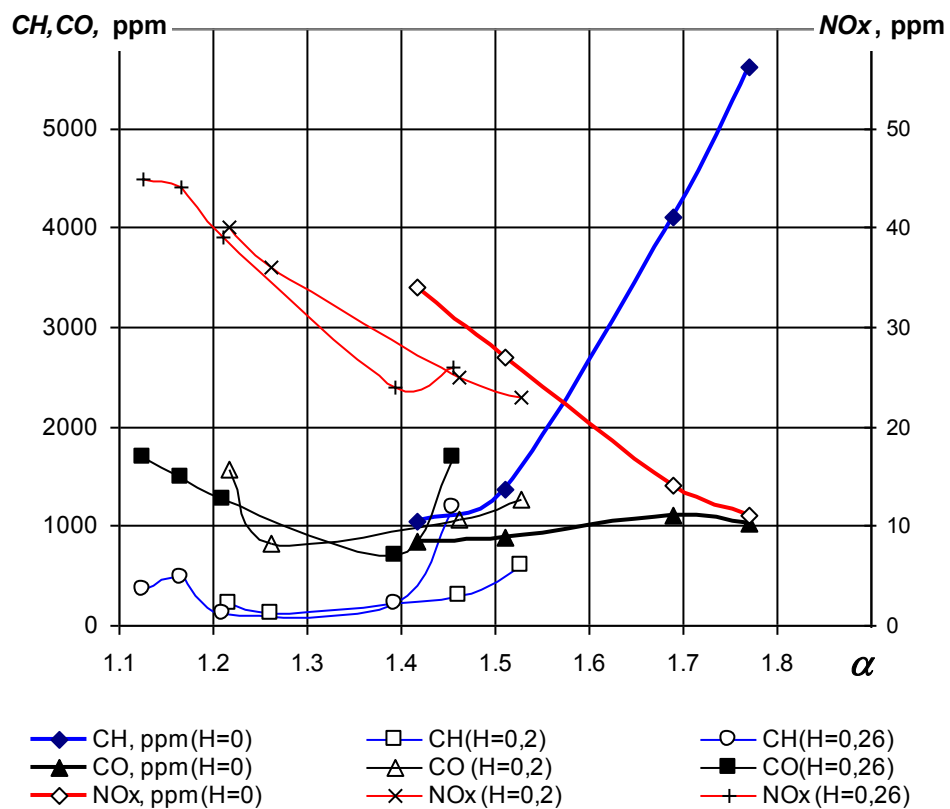


Рисунок А.39 –Регулировочная характеристика по составу смеси

($n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $Pe = 0$, $УОЗ = 0$).

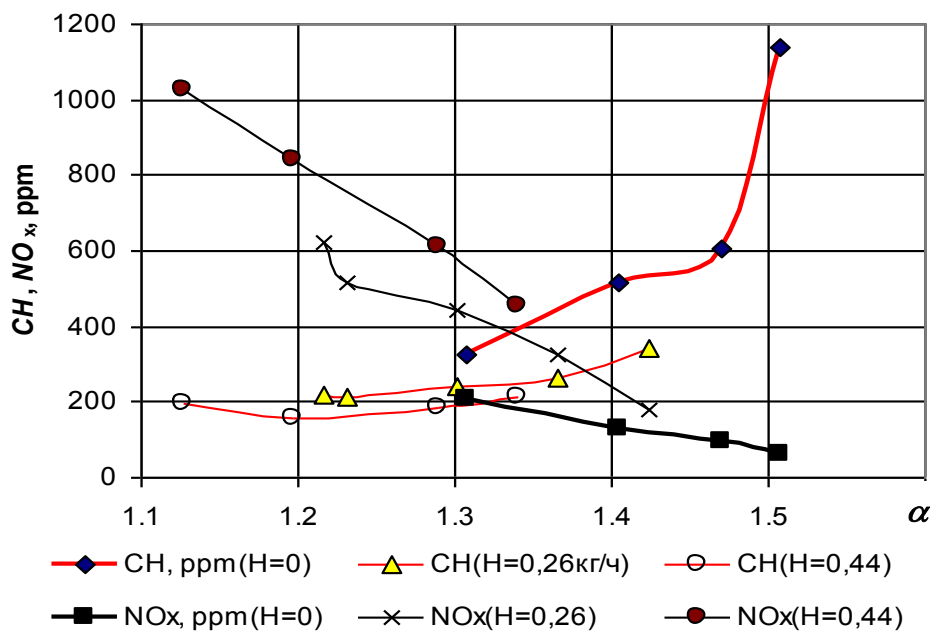


Рисунок А.40 –Регулировочная характеристика

($n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $Pe = 1,46 \text{ кг/ч}$, $УОЗ = 15 \text{ гр.п.к.в.}$)