

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

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

Энергетические комплексы и системы управления
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Повышение эффективности стационарных гибридных установок

Студент

А.А. Пионтковский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент, А.М. Дзюбан

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« ____ » июня 2018 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« ____ » июня 2018 г.

Тольятти 2018

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Выбор основных характеристик стационарной гибридной установки	6
1.1 Рекомендации по выбору элементов гибридной установки.....	7
1.2 Выбор первичного источника (двигателя внутреннего сгорания).....	11
2 Описание конструкции базовых элементов ГУ	16
2.1 Силовая установка	16
2.1.1 Двигатель	16
2.1.2 Генератор	18
2.1.3 Муфта	18
2.2 Каркас электроагрегата.	18
2.3 Шкаф аккумуляторных батареи и пусковое устройства.....	18
2.4 Система управления, контроля и защиты	19
3 Концепция повышения эффективности стационарной гибридной установки	20
3.1 Различия между двигателями с гомогенным и гетерогенным видами горения	20
3.1.1 Двигатели с гомогенным типом горения.....	20
3.1.2 Двигатели с гетерогенным типом горения.....	21
3.2 Применение водородосодержащего газа.....	21
3.3 Обзор методов получения водородосодержащего синтез-газа путем каталитической конверсии углеводородов	23
3.4 Схема гибридной силовой установки.....	36
4 Результаты экспериментальных исследований и их анализ	41
4.1 Эффективность системы ДВС-ГСГ.	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	60

ПРИЛОЖЕНИЕ А	64
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	67
ПРИЛОЖЕНИЕ В	69
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	76
Результаты исследований газового двигателя с добавками водорода.	76
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	79
1 Назначение системы	79
2 Технические данные.....	79
3 Состав системы подачи «гремучего» газа и его компонентов	79
4 Принцип работы системы.....	79

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направления развития энергетики является развитие малой энергетики. Сегодня данное направление практически не развито. В основе малой энергетики лежат установки, которые должны отвечать определенным требованиям, таким как высокая экономичность, экологичность, надежность и т.д. При этом, основной задачей малой энергетики является обеспечение энергетической независимости различных потребителей, особенно таких потребителей, которые являются общественно важными составляющими гражданского общества. К таким потребителям можно отнести, например, удаленные единичные технические и населенные объекты, больницы и др.

При решении вопроса энергетической независимости необходимо решить комплекс задач, это экономическая доступность (низкая цена), дешевая и простая эксплуатация энергетической установки. Таким образом, целью магистерской диссертации является анализ возможности повышение эффективности стационарных гибридных установок.

Для достижения поставленной цели, необходимо выполнить следующие задачи исследования:

- провести анализ существующих гибридных установок;
- определить перспективные направления развития гибридных систем;
- разработать рекомендации на основе проведенного анализа по повышению экономических показателей стационарных гибридных установок.

Объектом исследования является процесс, обеспечивающий повышение эффективности стационарной гибридной установки.

Предметом исследования являются стационарная гибридная установка.

Научная новизна. Научная новизна заключается в обосновании метода, обеспечивающего повышение эффективных показателей установки.

Практическая значимость. Практическая значимость работы заключается в разработке технического предложения, обеспечивающего улучшенные показатели гибридной установки.

На защиту выносятся:

- направления возможности повышения эффективных показателей гибридных установок;
- рекомендации по дальнейшему совершенствованию стационарных гибридных установок, в частности двигателя внутреннего сгорания как основного элемента гибридной установки.

Апробация работы: основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» ТГУ.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 3 печатных работ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения включающего основные результаты и выводы и списка используемых источников.

1 Выбор основных характеристик стационарной гибридной установки

«В Энергетической стратегии России на период до 2030 года одной из задач является модернизация и создание новой энергетической инфраструктуры на основе масштабного технологического обновления энергетического сектора экономики страны. Отмечается, что энергетическая безопасность является одной из важнейших составляющих национальной безопасности страны. Обеспечение энергетической безопасности определяется ресурсной достаточностью, экономической доступностью, экологической и технологической допустимостью. Ресурсная достаточность определяет физические возможности бездефицитного обеспечения энергоресурсами национальной экономики и населения, экономическая доступность – рентабельность такого обеспечения при соответствующей конъюнктуре цен, экологическая и технологическая допустимость – возможность добычи, производства и потребления энергоресурсов в рамках, существующих на каждом этапе технологий и экологических ограничений, определяющих безопасность функционирования энергетических объектов» [1].

«Меморандум о создании и деятельности технологической платформы «Малая распределенная энергетика» гласит, что одними из основных сфер применения новых технологических решений малой распределенной энергетики являются» [37]:

- когенерационные установки для модернизации коммунальной инфраструктуры поселений;
- типовые комплекты оборудования и модульные технологические решения для энергоснабжения удаленных и изолированных потребителей;
- комплексные локальные энергосистемы с максимально возможным использованием местных топливных ресурсов.

Таким образом, работы по темам, связанным с исследованиями в области энергоснабжения удаленных потребителей на базе гибридных установок, представляются актуальными.

Принципиальная схема силовой установки представлена на рисунке 1.1

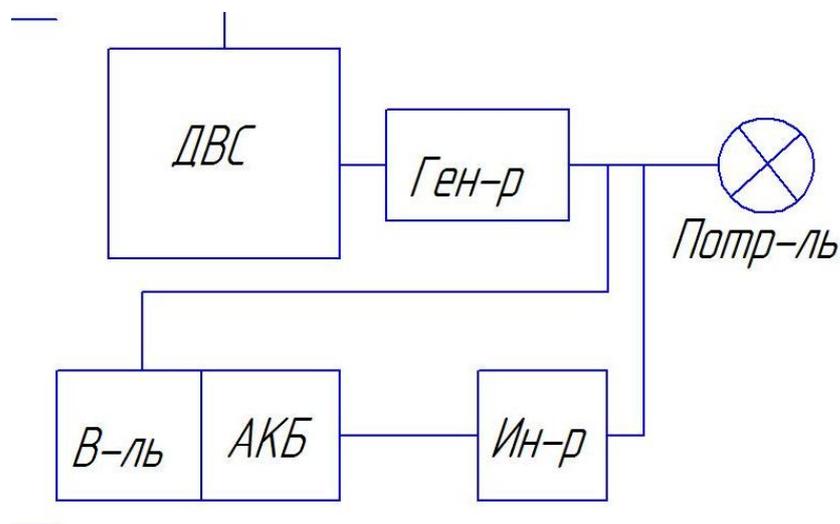


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема ГУ

На рисунке 1.1 приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; Ин-р – инвертер; В-ль – выпрямитель; Ген-р – генератор; Потр-ль – потребитель; АКБ – аккумуляторные батареи.

Выделяют три базовых режима работы гибридной установки:

- режим минимальной мощности;
- режим частичной и номинальной мощности установки;
- режим пиковых нагрузок.

1.1 Рекомендации по выбору элементов гибридной установки

Выбор гибридной установки (ГУ) основан на анализе целей ее назначения и в каких условиях планируется ее эксплуатация. Необходимо отметить, что однозначная методика выбора ГУ на сегодняшний день отсутствует, а подбор параметров ГУ необходимо в большинстве случаев осуществлять индивидуально. Тем не менее, существуют определенные правила и рекомендации, которые необходимо учитывать при выборе ГУ.

ГУ в первую очередь предназначены для работы в качестве основного источника. Классифицировать источник энергии по назначению можно с помощью таблицы 1.1.

Основные источники энергии может эксплуатироваться в двух основных условиях:

- параллельной работы с централизованными энергосетями;
- в «островном» (автономном) режиме.

Таблица 1 - Назначение электростанций собственных нужд.

Назначение электростанции собственных нужд	Режим работы, потребители
Основной (базовый) источник электроэнергии	Электростанции с наработкой за год свыше 3000 ч, количеством пусков за год - менее 20, временем непрерывной работы - более 3500 ч, временем пуска и приема нагрузки до 30 мин. Обеспечивают электроэнергией все технологические нагрузки объекта, сопутствующих инфраструктур и сторонних потребителей.
Резервный источник электроэнергии	Электростанции с наработкой за год - 300÷3000 ч количеством пусков - 20÷50 пуск/год, временем пуска и приема нагрузки не более 5 мин. Способны обеспечить электроэнергией все технологические нагрузки объекта, сопутствующих инфраструктур и сторонних потребителей при отключении основного источника электроэнергии
Аварийный источник электроэнергии	Электростанции, предназначенные для аварийного электроснабжения потребителей 1 категории, в том числе особой группы электроприемников при отключении основного или резервного источника электроэнергии. Продолжительность работы, как правило, до 300 ч/год, количество пусков - свыше 50 пуск/год, время пуска и приема нагрузки от 5 до 30 с.

При этом каждый из режимов работы имеет свои нюансы по подключению выбора автоматики и т.д. В частности, с точки зрения эффективности, оптимальным режимом работы ГУ является параллельная работа с централизованными энергосетями. Эффективность ГУ максимальна, не требуется больших запасов мощности ГУ, т.к. недостаток мощности компенсируется из централизованной сети и т.д. Однако, практическая реализация работы ГУ в параллельном режиме сопряжено со значительной

бюрократической волокитой, прежде всего из-за сложностей согласования работы ГУ с поставщиками электроэнергии, хотя законодательно работа в параллельном режиме не запрещена. В условиях Российских реалий время согласования может занять более года. Следует отметить, что в Евросоюзе в режиме параллельной работы эксплуатируется более 90 % всех энергетических установок.

При работе на автономном режиме мощность ГУ определяется исходя из условий наличия запаса мощности на пиковые нагрузки. При этом в зависимости от типа потребителей пиковые нагрузки могут превышать номинальные в 2-3 раза. Как вариант можно рассматривать «полуавтономный» режим работы ГУ. ГУ подключается к электросетям через АВР, который в свою очередь выключает ГППУ при превышении мощности потребителей мощности ГУ. Однако, такой подход допустим к энергопотребителям относительно небольшой мощности и отсутствии дефицита мощности.

1.1.1 Выбор мощности ГУ

Во-первых, необходимо провести анализ энергопотребления объекта. На основе проведенного анализа установить график суточного, годового и пиковые значения потребления энергии. Чаще всего, это довольно длительный и трудоемкий процесс, поэтому допустимо пользоваться приближенными методами оценки энергопотребления. Например, на основе анализа типов энергопотребителей и/или энергетических балансов.

При выборе мощности ГУ, как показывает практика, предпочтение необходимо отдавать выработки электроэнергии, т.е. подбор проводить по электрической мощности.

Номинальная мощность ГУ определяется при параллельном режиме работы – исходя из номинальной мощности энергопотребления. При автономной работе – исходя из пиковой мощности энергопотребления.

При ярко выраженном увеличении потребления энергии по часам суток возможно применение нескольких ГУ. Однако разделение мощности является

экономически целесообразным лишь при общей электрической мощности свыше 200 кВт. В случае меньшей мощности более рентабельным является согласование путем модуляции мощности отдельной установки. Минимальная мощность ГУ определяется экономической эффективностью использования ГУ и ее техническими возможностями. Обычно минимальная мощность ГУ вирируется в диапазоне 30 – 50% от номинальной мощности. Следует также понимать, что при уменьшении мощности ГУ удельный эффективный расход топлива возрастает, при этом электрический КПД ГУ может снижаться до значений менее 10%. В этом случае ГУ практически работает как «газовый котел», но с существенно меньшим КПД (КПД газового котла составляет величину порядка 80-95 %, а КПД ГУ по теплу в любом случае не превысит величину 70%).

Далее необходимо установить категорию энергопотребителей, которая определяет уровень (степень) автоматизации ГУ согласно ГОСТ 13822-82. В отношении обеспечения надежности электроснабжения электроприемники разделяются на следующие категории /

«Электроприемники первой категории – электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, угрозу безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения» [34].

«Из состава электроприемников первой категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров» [34].

«Электроприемники второй категории – электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта,

нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей» [34].

«Электроприемники третьей категории – все остальные электроприемники, не попадающие под определение первой и второй категории» [34].

«В электроагрегатах и электростанциях, автоматизированных по 1-3-й степеням, защита электрических цепей входит в объем операций аварийной защиты. Аварийная защита и аварийно-предупредительная сигнализация электроагрегатов и электростанций 1-й и выше степеней автоматизации должна срабатывать при достижении предельных значений параметров: сопротивление изоляции, давление масла, температура охлаждающей жидкости и т. п., - перечень которых уточняют в стандартах или технических условиях на электроагрегаты и электростанции конкретных типов. Кроме того, должно быть предусмотрено ручное отключение защиты и возможность работы при отключенной защите. Система автоматизации электроагрегатов и электростанций, имеющих аварийную защиту, должна обеспечивать останов первичного двигателя исполнительными устройствами при аварийных режимах. Аварийный останов должен сопровождаться световым сигналом на щите управления» [34].

1.2 Выбор первичного источника (двигателя внутреннего сгорания)

Определяющим свойства ГУ является первичный источник – двигатель внутреннего сгорания. Именно он, во много будет определять технические характеристики и экономические параметры ГУ в целом.

В своем большинстве газовые двигатели, применяемые в составе ГУ, являются конвертированными дизельными двигателями для работы на газовом топливе. Вследствие того, что характеристики тепловыделения газового топлива существенно отличаются от характеристик дизельного топлива, конструкция и настройки двигателя существенно изменены. В частности, при переводе на газовое топливо снижают степень сжатия до величин обеспечивающих

бездетонационную работу двигателя, изменяют форму камеры сгорания двигателя и т.д.

Таблица 1.1 – Степень автоматизации в части электроснабжения

Уровень сложности	Объем автоматизации	дизель-генератора по ГОСТ 10032—80, дизеля по ГОСТ 14228—80	Электроагрегата и электростанции
Первый	Стабилизация выходных электрических параметров Защита электрических цепей	–	0
Второй	Стабилизация выходных электрических параметров Аварийно-предупредительная сигнализация и аварийная защита Автоматическое поддержание нормальной работы после пуска и включения нагрузки, в том числе без обслуживания и наблюдения в течение 4 или 8 ч	1	1
Третий	Стабилизация выходных электрических параметров Аварийно-предупредительная сигнализация и аварийная защита Дистанционное и (или) автоматическое управление при пуске, работе и остановке со сроком необслуживаемой работы в течение 16 и 24 ч	2	2
Четвертый	Стабилизация выходных электрических параметров Аварийно-предупредительная сигнализация и аварийная защита Дистанционное и автоматическое или только автоматическое управление всеми технологическими процессами со сроком необслуживаемой работы в течение 150 или 240 часов	3	3

Кроме этого на рынке присутствуют газовые двигатели конвертированные из двигателей работающих на легком топливе (бензиновые). Безусловно, стоимость конвертирования таких двигателей существенно ниже. Однако, как показывает практика, ресурс и надежность таких двигателей значительно уступают двигателям описанным в первом случае, в основном из-за

особенностей конструкции (запас прочности деталей дизельных двигателей конвертируемых для работы на газовом топливе выше нежели у конвертируемых бензиновых двигателей). Двигатели такого типа целесообразно использовать в системах резервного энергообеспечения. В любом случае, без проведения специальных мероприятий по переводу двигателя на газовое топливо добиться приемлемых параметров надежности и ресурса двигателя невозможно.

Размерность двигателя и число цилиндров. Размерность двигателя оказывает существенное влияние на эффективность (полноту) сгорания топлива. С увеличением рабочего объема цилиндра полнота сгорания топлива может существенно уменьшаться, что особенно важно для двигателей работающих на сортах топлив с высоким метановым числом.

Количество цилиндров оказывает влияние на равномерность хода. С увеличением числа цилиндров крутящий момент двигателя более равномерен, что положительно сказывается на характеристике ГГПУ в целом.

Степень сжатия. Степень сжатия современных газовых двигателей может достигать 12-14. Известно, что с повышением степени сжатия увеличивается КПД двигателя. Однако основным ограничением возможностей повышения степени сжатия является детонация топливовоздушной смеси. Величина допустимой степени сжатия определяется сортом топлив применяемых в газовом двигателе, а именно его метановым числом.

Таблица 1.3 - Допустимая степень сжатия

Топливо	Метановое число	Допустимая степень сжатия
Метан	100	15
Этан	44	14
Пропан	32	12
Изо-Бутан	15	8
н - Бутан	10	6,5

Следует отметить что двигатели, оснащенные турбонаддувом, должны иметь меньшую степень сжатия, чем указанные в таблице 1.2.

Турбонаддув. Двигатели оснащенные турбонаддувом обычно имеют несколько лучшие массо-энергетические показатели по сравнению с атмосферными двигателями. Однако, такие двигатели работают в более теплонапряженных условиях, а следовательно имеют несколько меньший ресурс по сравнению с атмосферными двигателями. Наибольшее применение двигатели, оснащенные турбонаддувом, получили при работе на низкокалорийном топливе. Кроме этого, двигатели с наддувом эффективно использовать при питании газом низкого давления, т.к. увеличением степени повышения давления турбокомпрессора можно компенсировать потерю мощности двигателя.

Необходимо отметить, что применение турбонаддува накладывает некоторые ограничения на возможность регулирования двигателя вследствие ограничения максимальной температуры отработавших газов. Это особенно важно на переходных режимах работы двигателя, т.е. в момент наброса и сброса нагрузки. Допустимое кратковременное повышение температуры отработавших газов на выходе из цилиндра двигателя не должно превышать в зависимости от характеристик турбокомпрессора 600-750 С.

Степень сжатия дизельных двигателей внутреннего сгорания составляет ориентировочно 16-25. Максимальное значение степени сжатия ограничивает технологическая возможность точность изготовления деталей цилиндропоршневой группы механические потери. Минимальное значение степени сжатия определяется температурой самовоспламенения топлива.

Эксплуатационные показатели двигателя – один из наиболее важных параметров определяющих эффективность использования ГУ. Эксплуатационные расходы могут быть соизмеримы со стоимостью самой ГУ. Поэтому при выборе первичного источника двигателя необходимо как минимум запросить у

производителя ресурс двигателя, количество масла на угар, а также карту и стоимость технического обслуживания.

Эффективность ГУ обеспечивается при эксплуатационных показателях двигателя представленных в таблице 1.4

Таблица 1.4 – Рекомендованные эксплуатационные показатели

Показатель	
Ресурс, моточас	не менее 20 000
Межсервисный интервал, моточас	не менее 500
Количество масла на угар, г/кВт ч	не более 0,5

Современные двигатели ГУ обеспечивают ресурс 40000 – 60000 моточасов, межсервисный интервал до 1000 моточасов, масло на угар 0,3 г/кВт ч.

2 Описание конструкции базовых элементов ГУ

В состав гибридной установки включены следующие основные элементы:

- каркас электроагрегата, предназначен для размещения и крепления основных и вспомогательных агрегатов;
- двигатель внутреннего сгорания являющимся первичным источником энергии;
 - генератор – устройство для получения электрической энергии, в зависимости от назначения установки генераторы могут быть разного типа;
- система отбора тепла или система охлаждения, предназначена для поддержания температуры установки в заданном температурном режиме. В отдельных случаях тепло отводимое в систему охлаждения может быть утилизировано, такие установки называются когенерационными;
- системы управления, контроля и защиты оборудования;
- шкафы автоматики и вспомогательной автоматики электроагрегата;
- блок аккумуляторных батарей;
- система подачи топлива;

Дополнительно установка может оснащаться другими системами позволяющими ее эксплуатировать в эффективном режиме.

Схема электроагрегата и типовое размещение агрегатов, узлов и систем представлена на рисунке 2.1. Размещение агрегатов, узлов и систем (компоновка) модуля может быть изменена с целью повышения эффективности и удобства работы и обслуживания. Состав, а также компоновка, по согласованию с заказчиком, может быть изменена с целью, обеспечения требований норм безопасной эксплуатации модуля.

2.1 Силовая установка

2.1.1 Двигатель

Двигатель представляет собой двигатель внутреннего сгорания специально адаптированный для работы в составе гибридной установки.

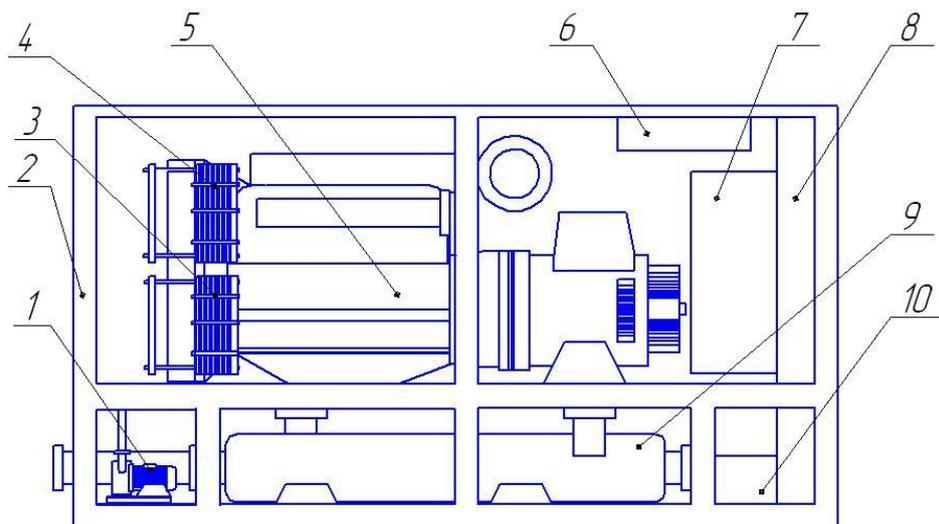
Компоновка двигателя в зависимости от мощности электроагрегата – рядная или V-образная.

Конструкция двигателя реализована таким образом, чтобы обеспечить максимальную надежность работы электроагрегата и его ресурс

Номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя - 1500 мин-1.

Допустимый заброс оборотов не превышает 2200 мин-1.

Назначенный ресурс двигателя не менее 40000 моточасов.



1- циркуляционный насос; 2 – каркас электроагрегата; 3 - теплообменный аппарат для отвода-подвода тепла масла; 4 - теплообменный аппарат для отвода тепла рубашки охлаждения электроагрегата; 5 – блок двигатель - генератор; 6 - системы электрического освещения и система электрооборудования автоматической пожарной сигнализации; 7, 8 - шкаф основной и вспомогательной; 9 - теплообменный аппарат для отвода тепла отработавших газов газопоршневого электроагрегата; 10 - шкаф аккумуляторных батарей

Рисунок 2.1 – Схема энергетического модуля

2.1.2 Генератор

«Синхронный трехфазный генератор производит электрический ток. Генератор приводится в действие через муфту от двигателя. Он имеет жесткое соединение с двигателем» [36].

«Синхронный генератор представляет собой генератор с автоматическим регулированием $\cos(\varphi)$ в диапазоне $\cos(\varphi) = 0,8 - 1,0$, со статическим устройством, с электронным регулированием напряжения и с защитой от пониженных оборотов.» [36].

2.1.3 Муфта

Высокоэластичная муфта обеспечивает эластичное соединение между газовым двигателем и трехфазным синхронным генератором. Подверженный тангенциальным нагрузкам резиновый элемент муфты демпфирует колебания при вращении и выравнивает несоосность валов.

2.2 Каркас электроагрегата.

«Каркас приспособлен для размещения на нем основного и вспомогательного оборудования, а также элементов для шумопоглощения и утепления» [36].

«Каркас представляет собой конструкцию из устойчивого к скручиванию полого профиля из стандартной стали. На каркасе смонтированы резиновые компенсаторы, которые гасят вибрацию блока двигатель-генератор» [36].

2.3 Шкаф аккумуляторных батареи и пусковое устройства

«Для пуска двигателя электроэнергия поступает на стартер и в систему зажигания (24 В) от аккумуляторных батарей. Кроме того, ток от аккумуляторных батарей подается на устройства контроля и регулирования (24 В)» [36].

Стартер обеспечивает запуск двигателя. Пусковое реле служит как для перемещения шестерни в зацепление с зубчатым венцом двигателя, так и для замыкания контактного моста для включения главного тока стартера.

«Муфта свободного хода (обгонная муфта) действует так, что ведущий вал якоря соединен с шестерней, однако при более быстром вращении шестерни (при "опережении") связь между ней и валом якоря прекращается. Стартер двигателя оборудован пусковым реле и редуктором. Питающее напряжение приводного механизма стартера составляет 24 В» [36].

2.4 Система управления, контроля и защиты

«Система управления агрегатом (двигатель-генератором) включает в себя:

- технологический пульт управления и приборов;
- шкаф управления;
- датчики автоматике;
- электронный регулятор частоты вращения.

3 Концепция повышения эффективности стационарной гибридной установки

3.1 Различия между двигателями с гомогенным и гетерогенным видами горения

Виды горения топлив разделяют на гомогенное и гетерогенное. Главным критерием, по которому их различают, являются фазы, в которых находятся горючее и окислитель. При гомогенном горении, горючее и окислитель находятся в одной фазе (обычно в газовой, например, смесь метана с воздухом). При гетерогенном горении, они находятся в разных фазах и окислитель, как правило, газообразный (например, O_2), а восстановитель твердый (уголь C , древесина, торф) или жидкий (бензин, мазут, дизельное топливо).

Гомогенное горение — горение газообразной смеси, в которой реагирующие вещества не имеют поверхности раздела. Гетерогенное горение - горение, которое происходит на поверхности раздела.

3.1.1 Двигатели с гомогенным типом горения

К таким двигателям относятся двигатели, питаемые газовым топливом или бензином. Топливоздушная смесь формируется вне цилиндра, во впускном коллекторе. Далее смесь воспламеняется искрой свечи зажигания.

Для того, чтобы сформировать равномерную смесь, топливо должно иметь высокую испаряемость при температуре окружающей среды, в противном случае не произойдет полного испарения топлива, а следовательно и полного сгорания топливоздушной смеси. Это значительно уменьшает возможный список альтернативных топлив. В двигателе с внешним смесеобразованием есть цикл сжатия топливной смеси. Это сильно ограничивает возможную степень сжатия (ϵ), а она сильно влияет на КПД двигателя. Повысить степень сжатия не позволяет явление детонация.

3.1.2 Двигатели с гетерогенным типом горения

Рабочий процесс дизельного двигателя происходит иначе, чем у бензиновых двигателей. В цилиндре сжимается только воздух, и сжимается до давления порядка до 30-50 бар. От сжатия температура воздуха поднимается до 700–900 °С. Топливо в этом случае подается непосредственно в камеру сгорания. Капли топлива испаряются, образуется топливовоздушная смесь. Смесь должна образоваться очень быстро, значительно быстрее, чем в бензиновом двигателе. Поэтому в камере сгорания образуется неоднородная (гетерогенная) топливовоздушная смесь, которая самовоспламеняется и сгорает. Степень сжатия дизеля обычно находится в пределах от 16 до 25. Малые значения встречаются у дизелей с наддувом, большие — для атмосферных дизелей с разделенными камерами сгорания. Нижний предел ограничения степени сжатия дизеля задается трудностями с пуском мотора зимой, а верхний ограничивается прочностью деталей: с увеличением степени сжатия растет и предельное давление в камере сгорания.

Поскольку в дизельных двигателях происходит горение гетерогенной смеси, такие двигатели способны работать на бедных и сверхбедных смесях. Это дает им значительное преимущество перед бензиновыми двигателями.

3.2 Применение водородосодержащего газа

«Многие сходятся во мнении, что применение водорода в качестве топлива имеет большие перспективы. Одно из самых больших преимуществ водорода как альтернативного источника энергии является то, что это третий самый распространенный элемент на Земле и ее ресурсы практически неограниченны» [1].

Водородо-воздушные смеси обладают высокой скоростью сгорания. Кроме этого, топливовоздушные смеси с добавкой водорода отличаются хорошей детонационной стойкостью. При небольшой массовой добавке водорода в топливовоздушную смесь время сгорания существенно уменьшается,

из-за того, что водород, предварительно смешиваясь с зарядом, поступающего в цилиндр, и эффективно воспламеняет смесь по всему объему. Это объясняется тем, что, хотя температура воспламенения водородно-воздушной смеси и выше, чем у смесей на базе углеводородных топлив, однако благодаря более низкой энергии активации H_2 , для его воспламенения требуется меньше количество энергии.

С точки зрения возможности регулировки двигателя это означает, что можно снизить дозу основного топлива в заряде и сделать воспламенение более поздним. Как следствие, этого наблюдается повышение эффективности работы двигателя.

Следует отметить, что ведущие страны мира такие как США, Германия, Япония, а с недавних пор и Китай проводят активные технические разработки в области водородных технологий.

В России переход на водородное топливо необходимо осуществлять поэтапно. Это объясняется, в первую очередь, отсутствием дешевой технологии производства и заправки водородом, развитие которой требует огромных капиталовложений, недостаточной степенью проработанности в научном плане всех вопросов его применения в качестве топлива. Для примера ряд технологий получения водорода в России находится на этапе опытно-конструкторских разработок, и на данном этапе мало применим к серийному производству.

«В связи с этим в первую очередь следует рассматривать применение водорода как добавки к основному традиционному углеводородному топливу (бензину, газу). Для исследования данного направления было предпринято множество работ, как в нашей стране, так и за рубежом» [3-6]. Однако данные исследования в основном были направлены на изучение возможности использования водорода в качестве добавки к бензину, а как добавка к природному газу нигде не рассматривался. Тем не менее, современные требования по экологичности силовых установок определяют более серьезные и глубокие исследования процессов сгорания в присутствии добавок водорода.

Наиболее перспективным направлением повышения эффективности двигателей внутреннего сгорания является воздействие на рабочий процесс. Существует большое количество технических решений реализующих такой способ. Наиболее перспективным является применение активизирующих процесс горения добавок. Такой подход позволяет обеспечить влияние непосредственно на причины, тем самым добиться повышения экологических и экономических показателей двигателя и гибридной установки в целом. Одной из таких добавок является водород, вследствие своих химических свойств. Таким образом, как с энергетической, так и с экологической точки зрения, по многочисленным данным водород считается наиболее перспективным топливом.

Решением указанной проблемы может быть использование водорода в качестве добавки к основному газообразному углеводородному топливу, например природный газ. С учетом того, что технологии использования природного газа в двигателестроении хорошо отработаны, то предложенный подход может являться довольно перспективным направлением для улучшения экономических и экологических параметров двигателя.

Подобные исследования были проведены U.S. Department of Energy FreedomCAR & Vehicle Technologies Advanced Vehicle Testing Activity в 2003 году, когда ряд автомобилей были испытаны на работу на природном газе и смеси природного газа и молекулярного водорода. Проверялась возможность уменьшения токсичности двигателей на CNG добавками водорода. Результаты при добавке 15% водорода показали снижение по циклу FTP-75 эмиссии CH на 34%, CO на 55%, однако увеличение эмиссии NOx на 92%. В отчете такое увеличение эмиссии NOx объяснено отсутствием модификации двигателя для работы на HCNG.[7, 8]

3.3 Обзор методов получения водородсодержащего синтез-газа путем каталитической конверсии углеводородов

Получение синтез-газа из природного газа. Наиболее трудно окисляемым углеводородом из состава природного газа является метан. Анализ

опубликованных в литературе данных показывает, что основное направление разработок катализаторов парциального окисления метана связано с нанесенными никелевыми катализаторами, включающими добавки оксидов щелочно-земельных металлов, оксидов хрома, циркония и т.д., получаемых различными способами: соосаждением компонентов, смешением порошков или паст с последующим прессованием или формованием, пропиткой носителя солями активного компонента [19 - 24]. Никелевый катализатор имеет практически все качества, необходимые для катализатора парциального окисления метана. Он более экономичен по сравнению с металлами платиновой группы, активными в этом процессе, и менее подвержен окислению относительно железа и кобальта, которые в условиях парциального окисления более легко окисляются и дезактивируются. Так, в работе [25] показано, что ряд способности к восстановлению $Ni/La_2O_3 \times Al_2O_3 > Co/La_2O_3 \times Al_2O_3 > Fe/La_2O_3 \times Al_2O_3$ совпадает с рядом их каталитической активности в реакции парциального окисления метана.

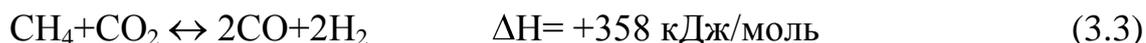
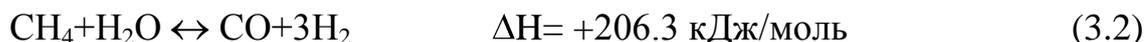
Таким образом, из анализа литературных данных следует, что в качестве активного компонента катализатора парциального окисления метана целесообразно использовать нанесенный никель. Одним из главных факторов, влияющих на активность и термостабильность катализаторов, является подбор носителя, обеспечивающего прочность, термостойкость, пористость, развитую поверхность. Носителями могут быть корунд, алюминаты, алюмосиликаты, шамот, оксид магния и оксид циркония. Применение в качестве носителя нашли оксиды алюминия и магния [9 - 14].

Механизм образования синтез-газа на катализаторе Ni/Al_2O_3 [15] следующий: кислород реагирует с поверхностью никеля, образуя NiO , а метан диссоциирует на поверхности Ni в форме карбида, при этом водород освобождается и немедленно десорбируется, затем карбид реагирует с NiO , образуя CO и CO_2 . В настоящее время общепринято, что реакция образования

синтез-газа идет последовательно через полное сжигание метана с образованием CO_2 и H_2O :



а затем оставшийся метан подвергается риформингу с образованием CO и H_2 по реакциям [16-18]:



Важным вопросом в разработке процесса каталитического парциального окисления метана является управление тепловыми режимами реактора. Вследствие сильной экзотермичности реакции (2,1) при проведении процесса в неподвижном слое катализатора на начальном участке последнего температура резко возрастает, достигая максимума, и образуются т.н. «горячие точки». Например, моделирование адиабатического реактора с неподвижным слоем $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатора показало, что для смеси метана с воздухом с соотношением $\text{CH}_4:\text{H}_2=1.67$ температура «горячей точки» может быть выше 1773 К в предположении, что сжигание метана и риформинг идут последовательно [19]. Каталитическое парциальное окисление метана проводят при малых временах контакта (доли секунд) и термической теплопроводности слоя не менее 0,15 Вт/(м К) [20]. Кипящий слой катализатора обладает высокой теплопроводностью и использование этого способа проведения процесса позволяет избежать образования горячих точек. Так в [21] проводили эксперименты в лабораторном реакторе с кипящим слоем катализатора. Реактор представлял собой кварцевую трубку диаметром 1.9-3.2 см, высотой 18-24 см. Испытывались различные катализаторы в виде зерен Al_2O_3 диаметром 80 мкм, на которые были нанесены активные компоненты в виде 0,5% родия, 1% никеля и 0,5% платины (% весовые). Время контакта при температуре 850°C находилось в пределах 0,1-0,5 секунд. Эксперименты были проведены на метан-кислородных смесях при соотношениях $\text{CH}_4:\text{O}_2$ в пределах 1-2. Наибольшая активность была у родия, несколько меньшая у никеля и самая низкая у

платины. Достигнутая в экспериментах степень превращения метана для Rh и Ni изменялась от 1 до 0.87, для Pt от 0.86 до 0.48 при увеличении концентрации метана с 18-20 % до 30 %. Из-за хороших свойств по теплопереносу реактор с кипящим слоем позволяет осуществлять каталитическое парциальное окисление метана почти в изотермических условиях. Исследование реактора с кипящим слоем катализатора Ni/Al₂O₃ показало, что температурный градиент по слою не выше 10°C при 800°C, однако после 100 часов работы слой зауглероживался [22]. Основной проблемой такого типа реакторов является агломерация частиц катализатора, которая наблюдается при высоких температурах (> 850°C для Ni и Pt и > 950 °C для Rh катализаторов).

Используя два последовательных реактора с неподвижным слоем катализатора синтез-газ получают [23] при введении кислорода в два этапа, что позволяет избежать образования «горячих точек» выше 1000°C. При соответствующих условиях на катализаторе Ni/La₂O₃/MgAl₂O₃-Al₂O₃ было достигнуто: конверсия CH₄ –93 %, селективность H₂ и CO - 97 и 98%, соответственно. Недостатком данного способа является громоздкость, необходимость наличия двух узлов подготовки газо-воздушной смеси.

Реакторы с монолитным катализатором (honeycomb-тип) были предложены Корчнаком и др. [24]. В [24] для повышения конверсии метана и меньшего зауглероживания катализатора в реакционную смесь добавлялась вода в молярном соотношении пар-углерод 0.4:1. Процесс проводился при температуре 870-1040°C и объемной скорости 20 000-500 000 час⁻¹. В этих условия углерод не откладывался на катализаторе, причем температура газовой смеси на входе была на 93°C ниже температуры самовоспламенения смеси (обычно 288-593°C). Звинкельс [25] использовал монолитный блок катализатора диаметром 1 м, высотой 2 м, с числом ячеек 300/дюйм², содержащий благородные металлы Pd и Pt на CeO₂/Al₂O₃ порошковом носителе. Анализ продуктов сгорания и продольного профиля температуры показал, что в блоке катализатора происходит сгорание метана с

последующим риформингом продуктов сгорания, в результате чего образуется синтез-газ. Шмидт с сотрудниками также использовал блочные катализаторы на основе благородных металлов. В качестве носителя использовалась керамическая пена, на которую наносились Pt-Rh [26]. Они обнаружили, что реакция парциального окисления метана определяется комбинацией транспортных и кинетических эффектов: диффузия реагентов к каталитической поверхности есть функция скорости потока и геометрии катализатора, в то время как реакционная кинетика зависит от температуры катализатора и его природы. Они также показали, что с уменьшением времени контакта от 10 до 0.1 мс возрастают конверсия CH_4 и селективности CO и H_2 . Гомес и др. [27], используя никелевый монолитный катализатор, провели парциальное окисление метана при давлении 12 атм и температуре выше 700°C при соотношении $\text{CH}_4:\text{O}_2 = 2:1$. Состав продуктов на выходе был равновесным, однако через 5 часов работы наблюдалось зауглероживание катализатора.

В [28] приведен вариант трубчатого реактора, в котором сопряжены по теплу экзотермический процесс глубокого окисления метана и эндотермический процесс риформинга продуктов сгорания. Реактор состоял из полый обогреваемой керамической трубы, внутри которой помещается алюминиевая труба с толщиной стенки 1 мм, покрытая в концевой части (10 см) снаружи и изнутри бифункциональным $\text{Rh}/\text{Al}_2\text{O}_3$ катализатором. Объем катализатора варьируют путем нанесения от одного до четырех слоев. Метаноокислородная смесь поступает внутрь алюминиевой трубы. Время контакта внутри трубы составляло 0,027-0,55 сек, а на внешней стороне – 0,11-0,22 сек. Большая часть генерированного тепла от сжигания метана передается через стенку алюминиевой трубы к наружной каталитической пленке, где проводится эндотермический паровой или CO_2 риформинг. Подбирая скорость подачи исходной смеси, начальную температуру обогрева керамической трубы и загрузку катализатора с обеих сторон алюминиевой трубы, можно управлять положением «горячей точки» по длине каталитического слоя, а также величиной

температурного разогрева. В таком реакторе с интегрированным теплообменником удастся контролировать температуру в зоне сжигания метана, одновременно значительно снижая величину «горячей точки». Тепловое сопряжение экзотермической реакции (сжигание метана) и эндотермических реакций риформинга является существенным отличием от традиционного трубчатого реактора, в котором каталитический слой находится внутри трубы.

Для осуществления каталитического парциального окисления метана разработан и испытан в лабораторном и промышленном масштабах неизотермический каталитический мембранный реактор [29]. Лимитирующей стадией процесса в таком реакторе является перенос кислорода через мембрану. Распределенной подачей кислорода по длине трубы удастся снять «горячую точку» на входе в мембранный реактор. Недостатком реактора данного типа является низкая производительность по синтез-газу из-за невысокой скорости подачи ионов кислорода в реакционную зону и большие габаритные размеры. Отдельную проблему составляет механическая прочность керамических труб, которые часто растрескиваются в операционных условиях.

При создании генератора синтез-газа (ГСГ) по принципу парциального окисления природного газа разработчиками Института катализа СО РАН за основу был взят промышленный никелевый высокотермостабильный катализатор ГИАП-3, приготовленный методом пропитки носителя $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ раствором азотнокислых солей никеля и алюминия. Содержание нанесенного никеля составляет 7,0 вес.%, структурообразующего (диспергирующего) промотора - $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ – 1,3 вес.%, остальное - $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. С целью увеличения теплопроводности каталитического слоя был использован никелевый пористый носитель (никелевая матрица). Выбор никеля для приготовления носителя обусловлен каталитической активностью и устойчивостью к окислению. Для увеличения механической прочности, теплопроводности и создания транспортных каналов каталитический слой армирован сеткой из нержавеющей стали. Переход к таким сложным каталитическим системам потребовал

необходимости разработки технологии создания металлопористых армированных катализаторов. Технология была разработана в лаборатории математического моделирования многофазных процессов ИК СО РАН [30].

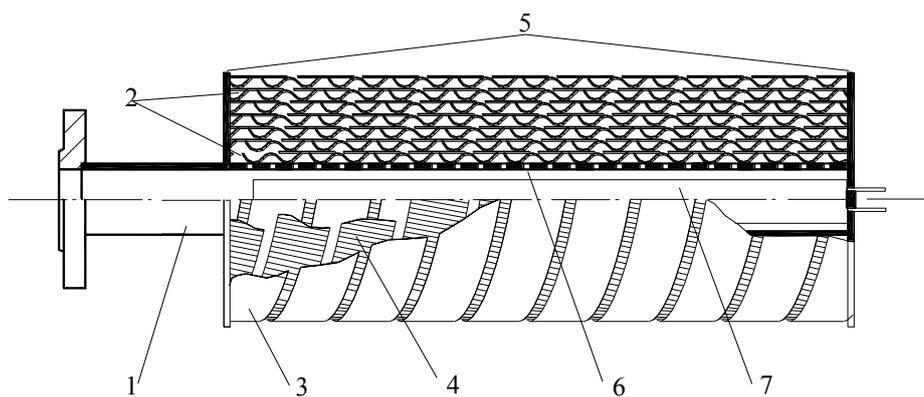
Изготовление армированного катализатора состоит из следующих стадий:

- отжиг сетки из нержавеющей стали;
- подготовка шихты из порошков металлического никеля, промышленного катализатора ГИАП-3 и оксида хрома в качестве промотора;
- приготовление коллоидного раствора органического клея и шликера;
- нанесение шликера на армирующую сетку;
- сушка, уплотнение на вальцах;
- нарезка полосы на ленты и гофрировка;
- намотка слоев плоской и гофрированной ленты на газораспределительную трубку, в которую подводится исходная реакционная смесь;
- спекание в печи.

Толщина каталитического слоя с каждой стороны армирующей сетки составляла ~0,25 мм, а его доля от общей массы с сеткой – 58-60%.

Ресурс разработанных катализаторов или их стабильность выражалась в их устойчивости к воздействию различных технологических факторов и сохранении ими активных свойств в течение достаточно длительного периода эксплуатации. Лучшие образцы катализаторов обеспечивали стабильную работу генератора синтез-газа в течение 4000-5000 часов непрерывной работы.

Схема разработанного в ИК СО РАН реактора для конверсии природного газа в синтез-газ представлена на рисунке 3.1.



1 – газораспределительная трубка; 2 – слой катализатора; 3 – плоская лента катализатора; 4 – гофрированная лента катализатора; 5 – фланцы; 6 – отверстия для реакционной смеси; 7 – стартовый подогреватель.

Рисунок 3.1 - Принципиальная схема каталитического реактора для конверсии природного газа в синтез-газ.

Реактор представляет собой цилиндрический корпус, внутри которой расположен газораспределительное устройство. Газораспределитель представляет собой перфорированную трубу – 1, заглушенную с одной стороны, внутрь которой подается газовоздушная смесь. Слой катализатора - 2 образуется из плоских - 3 и гофрированных - 4 газопроницаемых лент катализатора, намотанных на газораспределительную трубку и спеченных с ней. Ленты расположены таким образом, что витки последующего слоя перекрывают витки предыдущего. Таким образом, образуется пористая структура, состоящая из крупных транспортных пор – каналов (за счет гофр) и мелких пор (за счет пористости катализатора). Это создает благоприятные условия для протекания высокоинтенсивных каталитических процессов, каковым является каталитическое окисление углеводородов в области высоких температур. Окислы азота не образуются из-за низкой ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$) температуры и недостатка

кислорода. Толщина каталитического слоя обеспечивает полную конверсию метана при времени контакта не выше 0,3 сек.

Фотография радиального каталитического реактора вместе с газораспределительной трубкой и слоем армированного катализатора приведена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 - Общий вид генератора синтез-газа, газораспределительной трубки, плоских и гофрированных лент из армированного порометаллического катализатора.

Принцип работы описанного реактора следующий. Включают разогрев реактора и когда температура слоя катализатора поднимается до 600°C подогрев отключают и предварительно подготовленную газовоздушную смесь с соотношением газ/воздух 0.41-0.47 относительно стехиометрического подают в реактор. В результате протекания экзотермической реакции образуется синтез-газ и температура в каталитическом слое, прилегающем к газораспределительной трубке, поднимается до $\sim 900-1000^{\circ}\text{C}$. Для

предотвращения проникновения пламени во внутрь газораспределителя диаметр отверстий перфорации выбран равным 1.5 мм (меньше критического).

Для подавления скорости струй, вытекающих через отверстия перфорации, вокруг газораспределительной трубки расположен рассекатель струи. В простейшем случае рассекателем может быть металлическая сетка, либо перфорированная обечайка. После рассекателя газовоздушная смесь поступает в слой катализатора.

Было проведено исследование режимов работы ГСГ. Основной целью исследования было определение условий полной конверсии природного газа. Для этого экспериментально определялась зависимость относительного содержания метана на выходе из каталитического слоя ГСГ от коэффициента избытка воздуха (параметр α , равный отношению фактического расхода воздуха к стехиометрически необходимому для полного сгорания природного газа) и от температуры в слое. При проведении испытаний измерялась температура смеси на входе в каталитический слой и на выходе из него. Расходы природного газа и воздуха измерялись при помощи ротаметров, а для контроля правильности измерений использовался хроматограф: после смешения газа и воздуха измерялась концентрация метана в исходной смеси. Концентрации компонентов в смеси на выходе из каталитического слоя ГСГ также измерялись при помощи хроматографа (смесь предварительно осушалась). Все измерения проводились после выхода ГСГ в стационарный режим работы.

Испытания проводились при варьировании расхода природного газа от 200 до более 1700 нсм³/с. Результаты испытаний представлены в таблице 3.1. В предпоследней колонке таблицы приведено относительное содержание метана на выходе из каталитического слоя. В последней колонке показана величина производительности ГСГ по природному газу, отнесенная к объему ГСГ (объем каталитического слоя + объем распределительной трубки внутри слоя = 1.68 литра).

Кроме испытаний, выполненных для определения условий полной конверсии природного газа, были проведены эксперименты с измерением полного состава продуктов конверсии на выходе из реактора. Результаты этих испытаний представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.1 - Испытания режимов работы ГСГ.

Расход смеси, нсм ³ с ⁻¹	α	Температура, °C		CH ₄ out , об.%	CH ₄ out / CH ₄ in	Производительность, нл с ⁻¹ л ⁻¹
		T _{in}	T _{out}			
1064	0.427	1020	785	0.09	0.0053	0.12
1147	0.446	1092	815	0.07	0.0040	0.12
1434	0.397	996	795	0.14	0.0078	0.18
1560	0.431	1051	841	0.05	0.0028	0.18
1615	0.442	1091	880	0.05	0.0029	0.18
2060	0.402	1073	900	0.10	0.0057	0.24
2614	0.430	1090	960	0	0	0.30
3173	0.435	1090	1000	0	0	0.36
3376	0.387	998	908	0.03	0.0017	0.42
3419	0.398	975	900	0.02	0.0010	0.42
3480	0.410	1017	943	0	0	0.42
3545	0.416	1040	973	0	0	0.42
3698	0.438	1080	1020	0	0	0.42
4094	0.433	1050	965	0	0	0.48
4810	0.441	1020	1019	0	0	0.54
5257	0.461	1048	1060	0	0	0.55
5260	0.431	990	1050	0	0	0.59
6172	0.425	955	1055	0	0	0.71
7178	0.435	925	1060	0	0	0.85
8295	0.420	855	1070	0	0	0.97
8891	0.430	770	1070	0	0	1.03

Таблица 3.2 - Состав продуктов конверсии на выходе из ГСГ.

Расход природн. газа, нсм ³ с ⁻¹	300			675		
	Расход воздуха, нсм ³ с ⁻¹	1292	958	815	2893	2391
α , коэф. избытка воздуха	0.44	0.33	0.28	0.44	0.36	0.29
T _{in} , °C	990	852	810	1010	908	861
T _{out} , °C	800	621	576	979	870	715

Концентрация Н ₂ , об.%	25.4	29.0	30.8	26.2	31.0	29.7
Концентрация СО, об.%	12.8	14.3	14.1	12.9	14.7	16.1
Концентрация СО ₂ , об.%	4.24	4.57	3.82	4.42	2.99	2.90
Концентрация СН ₄ , об.%	0.01	1.27	4.83	0.00	1.07	2.13
Концентрация N ₂ , об.%	57.6	50.9	46.5	56.5	50.2	49.2

В таблицах 2.1, 2.2 коэффициент избытка воздуха рассчитывался по формуле $\alpha = \frac{[O_2]}{2 \cdot [CH_4]}$, где числитель и знаменатель соответствуют мольным долям кислорода и метана в конвертируемой смеси.

Относительное содержание метана в синтез-газе на выходе из ГСГ зависит как от коэффициента избытка воздуха, так и от общего расхода смеси. Влияние этих факторов трудно разделить, так как оба они влияют на тепловыделение и распределение температуры в каталитическом слое. В то же время, при температурах на выходе каталитического слоя выше 940 °С, даже при максимальных расходах смеси, наблюдалась полная конверсия природного газа. Т.е. время контакта реагентов с катализатором не является определяющим фактором в данном случае.

На рисунке 3.3 показана зависимость относительного содержания метана в смеси от температуры каталитического слоя на выходе из ГСГ. Для построения этой зависимости использовались данные, приведенные в таблице 3.1.

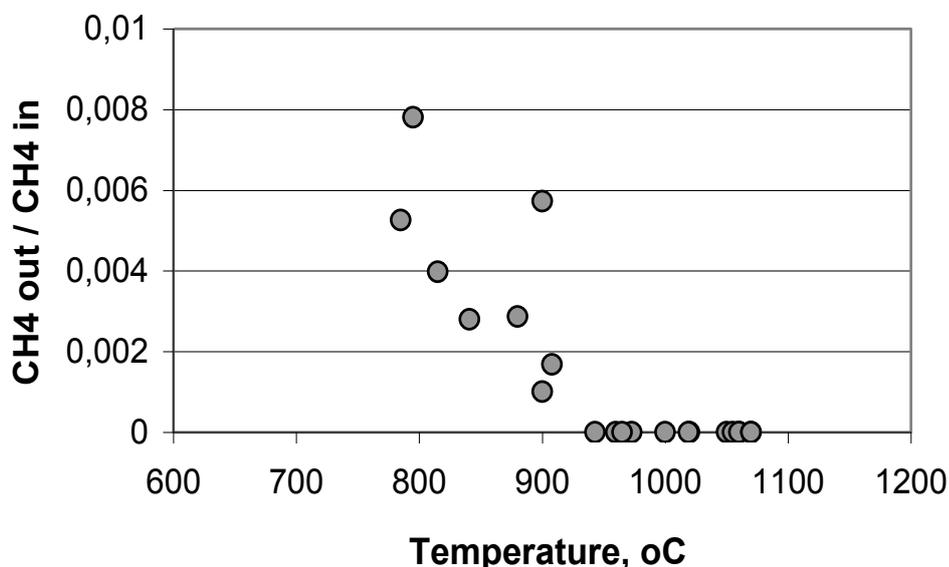


Рисунок 3.3 - Относительное содержание остаточного метана в зависимости от температуры на выходе из каталитического слоя ГСГ.

Запуск процесса воздушной конверсии природного газа в ГСГ нельзя произвести из холодного состояния, когда каталитический слой и подаваемая реакционная смесь имеют температуру окружающей среды. Поэтому, для достижения необходимой для запуска ГСГ температуры каталитического слоя, использовался предварительный подогрев. При этом ставилась задача минимизировать время прогрева настолько, насколько это возможно для данной радиальной конструкции ГСГ.

Были опробованы два способа предварительного прогрева каталитического слоя: электроподогрев и пламенный подогрев (сжигалась метано-воздушная смесь). В обоих случаях подогреватель помещался внутри газораспределительной трубки (вокруг которой располагается кольцевой слой катализатора). Динамика прогрева регистрировалась при помощи двух термопар, измерявших температуру на входе и на выходе из каталитического слоя. В результате проведенных экспериментов обнаружено, что время, необходимое для нагрева входной части каталитического слоя до 800°C, различается в 2-3 раза в зависимости от способа прогрева (при одинаковой мощности тепловыделения). Более быстрым оказался пламенный подогрев,

когда горячий поток прореагировавшей смеси проходил через каталитический слой (см. рисунок 3.4).

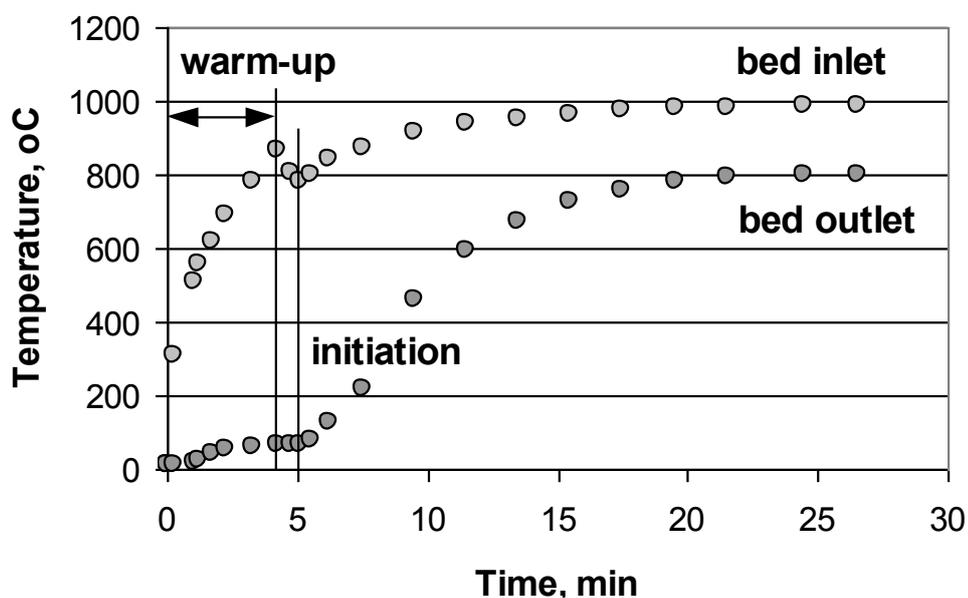


Рисунок 3.4 - Характерная кинетическая зависимость прогрева каталитического слоя пламенным способом и выхода ГСГ в стационарный режим работы.

Мощность тепловыделения пламенного нагревателя в приведенном эксперименте была примерно 1.7 кВт. Температура на входе в каталитический слой поднялась от комнатной до 870 °С за 4.25 минуты. Затем подача газа была прекращена, и начиная с 5-й минуты запускался рабочий режим ГСГ (расход природного газа составлял 290 см³/с, воздуха – 1100 см³/с).

3.4 Схема гибридной силовой установки

На основе представленного выше анализа можно рассмотреть следующую принципиальную схему ГУ (смотри рисунок 3.5). Установка дополнительно оборудуется генератором синтез газа устанавливаемого параллельно с системой подачи топлива (принципиальная схема генератора синтез-газа предстала на рисунках 3.6 и 3.7). В генераторе синтез газа часть топлива преобразовывается в синтез газ. Условия работы генератора синтез газа в зависимости от типа топлива имеют отличия. При этом количество вырабатываемого синтез газа

примерно равно 5-10% от расхода топлива. Указанное количество добавляемого синтез-газа в ТВС обеспечивает повышение эффективности установки в целом за счет повышения экономических и экологических показателей двигателя внутреннего сгорания.

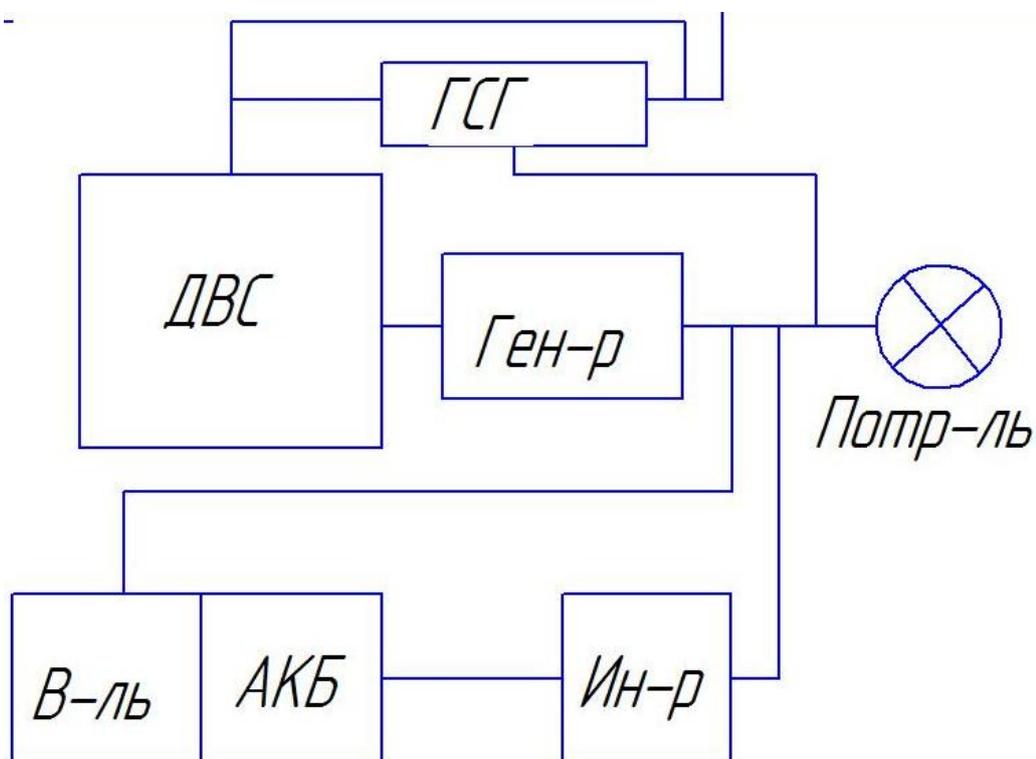


Рисунок 3.5 – Схема модернизированной гибридной установки (ГУ)

На рисунке 3.5 приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; Ин-р – инвертер; В-ль – выпрямитель; Ген-р – генератор; Потр-ль – потребитель; АКБ – аккумуляторные батареи; ГСГ – генератор синтез – газа.

Гибридная установка работает следующим образом:

- 1-й режим - режим минимальной мощности. На этом режиме мощность силовой установки составляет ориентировочно до 10 % от номинальной мощности. Данный режим характерен для работы установки, например, в ночное время. На этом режиме ДВС выключен, питание потребителя осуществляется только от АКБ. При этом идет разрядка АКБ.

- 2-ой режим - режим частичной и номинальной мощности установки. На этом режиме двигатель включен, питание потребителя осуществляет генератор. Мощность установки на этом режиме составляет от 10% до 100% от номинальной. На этом режиме осуществляется зарядка аккумуляторных батарей установки. Двигатель внутреннего сгорания при этом работает с добавкой синтез-газа к основному топливу.

- 3-й режим – режим пиковых нагрузок. Указанный режим является не расчетным. Установка на этом режиме может работать только ограниченное время. Этот режим работы установки включается в случае необходимости обеспечения кратковременного повышения мощности потребителя. При этом одновременно работает и ДВС и аккумуляторный источник энергии, генерируя суммарную мощность до 120 – 150 % от номинальной. Данный режим характерен при работе установки на переходных режимах (режим наброса нагрузки).

Предложенная схема позволяет, за счет синтез газа в топливовоздушную смесь обеспечит стабильную работу на бедных смеси. Значительное обеднение рабочей смеси позволяет улучшить, по сравнению с базовыми показателями, параметры по экологичности и экономичности двигателя внутреннего сгорания.

На рисунке 3.6 представлена схема добавки синтез газа в ДВС. На рисунке приняты следующие обозначения:

1. Штуцер подачи воздуха.
2. Источник питания.
3. Датчик расхода воздуха.
4. Подогреватель воздуха.
5. Испаритель.
6. Форсунка электромагнитная.
7. Штуцер подачи бензина.
8. Штуцер подачи метана.
9. Теплообменник.
10. Кран подачи синтез-газа в ДВС.

11. Успокоитель потока.
12. Кран сброса синтез-газа в атмосферу.
13. Кран подачи воздуха в подогреватель воздуха.
14. Конвертор синтез-газа.
15. Термопары.
16. Источник питания пускового нагревателя.
17. Нагнетатель воздуха.
18. Манометр контроля давления воздуха на выходе из нагнетателя.
19. Кран отбора синтез-газа.

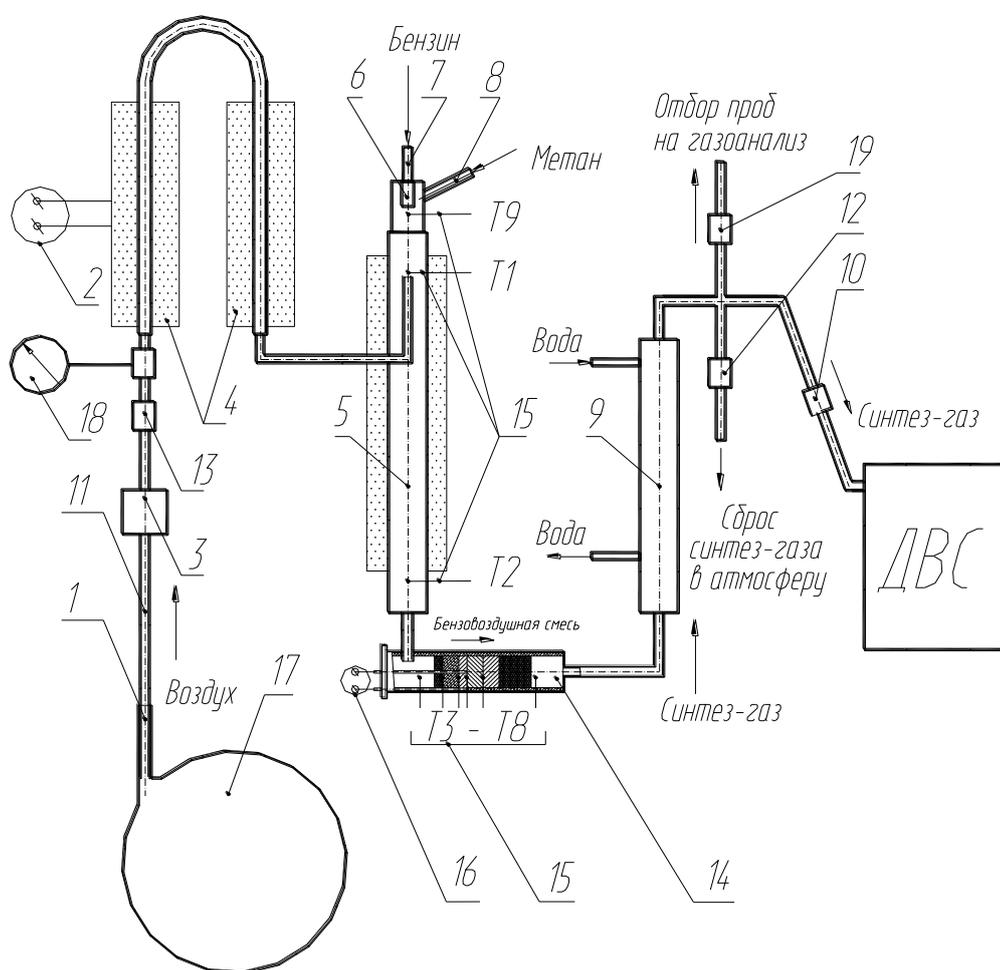


Рисунок 3.6 – Схема системы подачи синтез-газа

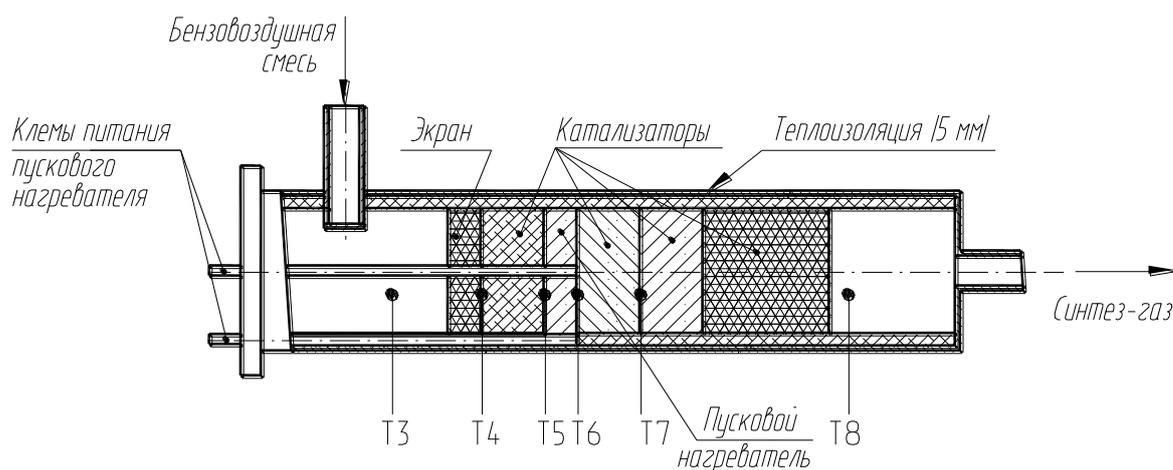


Рисунок 3.7 – Устройство каталитического блока генератора синтез-газа

Особенностью работы генератора синтез-газа являются повышенные требования к температурному режиму каталитического блока. Для контроля температуры катализатора, с целью поддержания оптимальной температуры катализатора, блок оснащен восемью термопарами. Термопары установлены по длине катализатора. В случае если температура выходит из диапазона допустимых значений, система управления изменяет пропорцию воздуха и топлива поступающих в генератор синтез-газа (ГСГ).

Следует отметить, что алгоритмы управления ГСГ требует дополнительной проработки.

4 Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Первичные данные для анализа результатов экспериментов в виде таблиц и графиков представлены в приложениях А, Б, В и Г

Целью анализа является получение зависимости расхода топлива выраженного в виде количества подведенного тепла как функция от количества добавляемого в ТВС водорода.

Аналізу были подвергнуты результаты испытаний, описывающие изменение расхода топлива в зависимости от состава топливовоздушной смеси и количества добавляемого водорода.

По результатам испытаний были созданы таблицы данных для каждого режима.

Таблица 4.1 - Экспериментальные данные расхода топлива для режима холостого хода

α	Gн		
	0	0,2	0,26
1			
1,12			2,3
1,16			2,2
1,2		2,3	2,2
1,26		2,3	2,25
1,3			
1,4	3,4	2,5	2,48
1,46		2,5	2,48
1,5	3,7	2,31	
1,52			
1,6		3	
1,7	4,4		
1,78	4,85		

Таблица 4.2 - Экспериментальные данные расхода топлива для режима $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 15 гр.п.к.в

α	Gн		
	0	0,26	0,44
1,1			
1,125			7,8
1,2			7,5
1,22		8,1	

1,24		8	
1,28			
1,3	9	8	7,45
1,34			7,45
1,36		8	
1,4	9,1		
1,43		8,15	
1,47	9,1		
1,5	9,7		

При помощи метода наименьших квадратов на основании экспериментальных данных были получены уравнения кривых расходов топлива. По полученным формулам была произведена интерполяция экспериментальных данных для получения более информативной таблицы. Проверка показала, что полученные точки совпадают с экспериментальными данными в пределах допустимой погрешности.

Графики экспериментальных данных представлены на рисунках 4.1 и 4.2

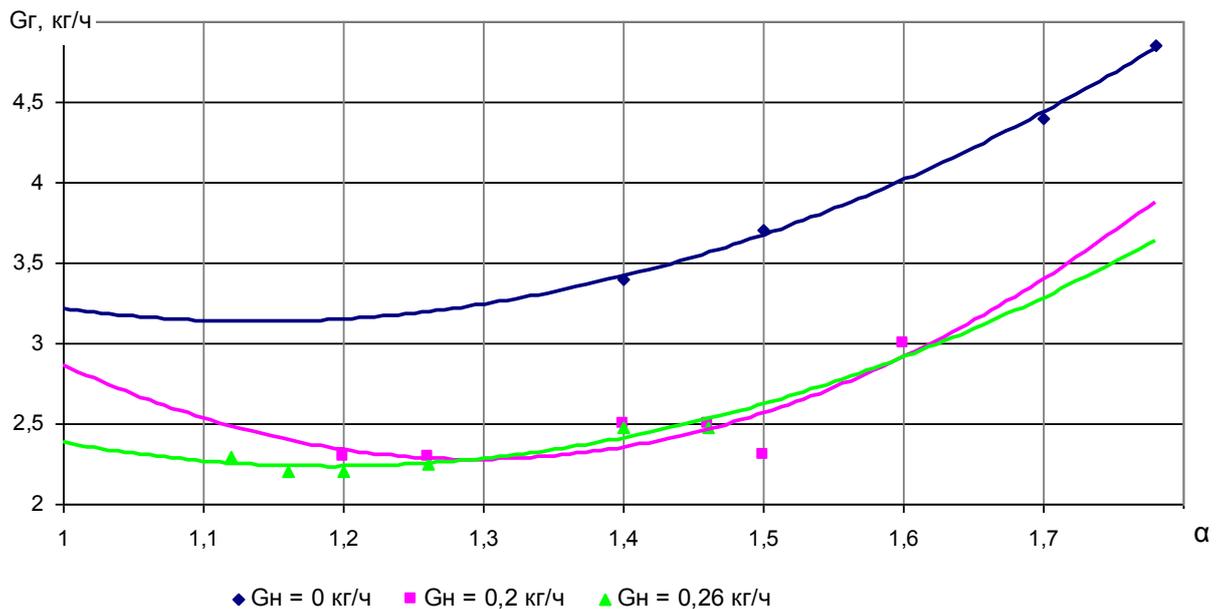


Рисунок 4.1 - Экспериментальные данные для режима холостого хода

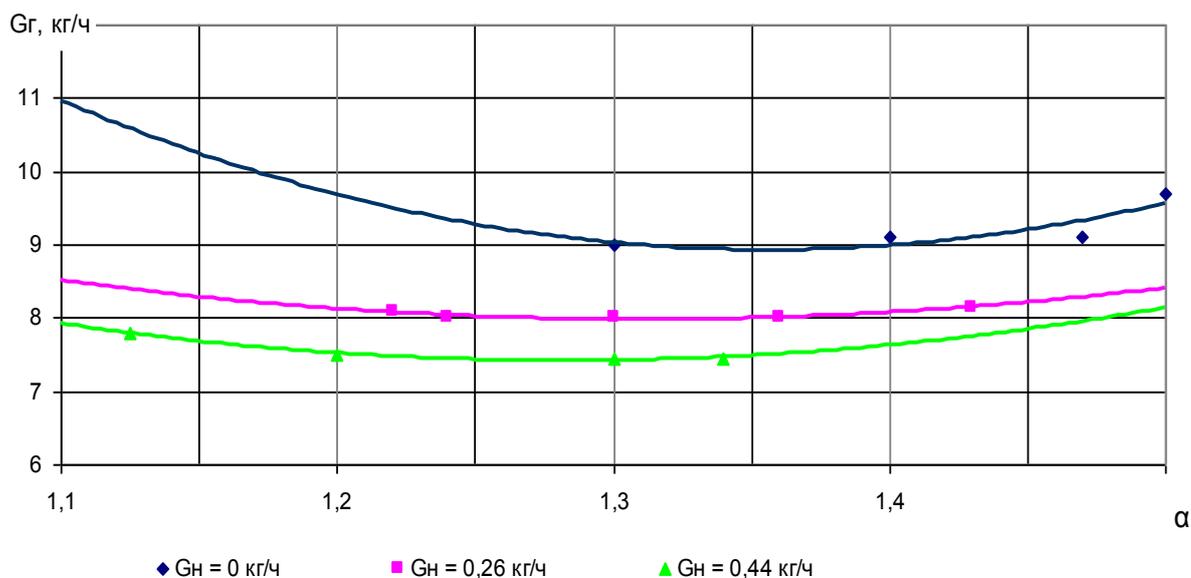


Рисунок 4.2 - Экспериментальные данные для режима $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 15 гр.п.к.в

Полученные тренды позволяют восстановить недостающие значения, не попавшие в эксперимент. Восстановленные данные представлены в таблицах 4.3 и 4.4. Восстановленные значения с достаточной точностью совпадают с экспериментальными данными. Для режима холостого хода процент отклонения не превышают 6%, а для режима 1500 мин^{-1} – не больше 2,5%.

Таблица 4.3 - Интерполированные данные расхода топлива для режима холостого хода

α	G _н		
	0	0,2	0,26
1	3,2125	2,8654	2,381
1,12	3,134047	2,48299	2,253436
1,16	3,134357	2,39901	2,236828
1,2	3,147896	2,336776	2,233176
1,26	3,193011	2,284197	2,251992
1,3	3,239626	2,276326	2,280731
1,4	3,414044	2,351784	2,409264
1,46	3,558385	2,462295	2,525253
1,5	3,67115	2,56315	2,618775
1,52	3,732494	2,621732	2,670395
1,6	4,010944	2,910424	2,909264
1,7	4,433426	3,393606	3,280731
1,78	4,830947	3,878005	3,636209

Таблица 4.4- Интерполированные данные расхода топлива для режима $n = 1500$ мин⁻¹, $P_e = 1,46$ кг/см², УОЗ = 15 гр.п.к.в

α	Gн		
	0	0,26	0,44
1,1	10,96143	8,51065	7,92206
1,125	10,58364	8,391828	7,792875
1,2	9,68272	8,1254	7,51944
1,22	9,501361	8,077162	7,475434
1,24	9,344797	8,038528	7,443602
1,28	9,106051	7,990072	7,416454
1,3	9,02387	7,98025	7,42114
1,34	8,933891	7,989418	7,46703
1,36	8,926093	8,008408	7,508234
1,4	8,98488	8,0752	7,62716
1,43	9,094056	8,150505	7,748308
1,47	9,326404	8,284525	7,952444
1,5	9,56575	8,41025	8,1375

При добавках водорода количество подведённой с топливом теплоты определяется по известной формуле. При этом принимаем, что низшая теплотворная способностях природного газа и водорода, соответственно, равны $H_{из} = 49,84$ и $H_{ин} = 120,736$ МДж/кг.

Таким образом, создаются таблицы количества подведенной теплоты для каждого режима (таблица 4.5 и 4.6)

Таблица 4.5 –Количество подведенной теплоты для режима холостого хода

α	Gн		
	0	0,2	0,26
1	160111	166958,7	150060,4
1,12	156200,9	147899,4	143702,6
1,16	156216,3	143713,9	142874,9
1,2	156891,1	140612,1	142692,9
1,26	159139,7	137991,6	143630,6
1,3	161463	137599,3	145063
1,4	170156	141360,1	151469,1
1,46	177349,9	146868	157250
1,5	182970,1	151894,6	161911,1
1,52	186027,5	154814,3	164483,8
1,6	199905,4	169202,7	176389,1
1,7	220962	193284,5	194903
1,78	240774,4	217427	212620

Таблица 4.6 - Количество подведенной теплоты для режима $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 15 гр.п.к.в

α	Gн		
	0	0,26	0,44
1,1	546317,7	455562,2	447959,3
1,125	527488,6	449640,1	441520,7
1,2	482586,8	436361,3	427892,7
1,22	473547,8	433957,1	425699,5
1,24	465744,7	432031,6	424112,9
1,28	453845,6	429616,5	422759,9
1,3	449749,7	429127	422993,5
1,34	445265,1	429584	425280,6
1,36	444876,5	430530,4	427334,2
1,4	447806,4	433859,3	433261,5
1,43	453247,7	437612,5	439299,5
1,47	464828	444292,1	449473,7
1,5	476757	450558,2	458696,8

По полученным данным построены графики, приведенные на рисунках 4.3 и 4.4.

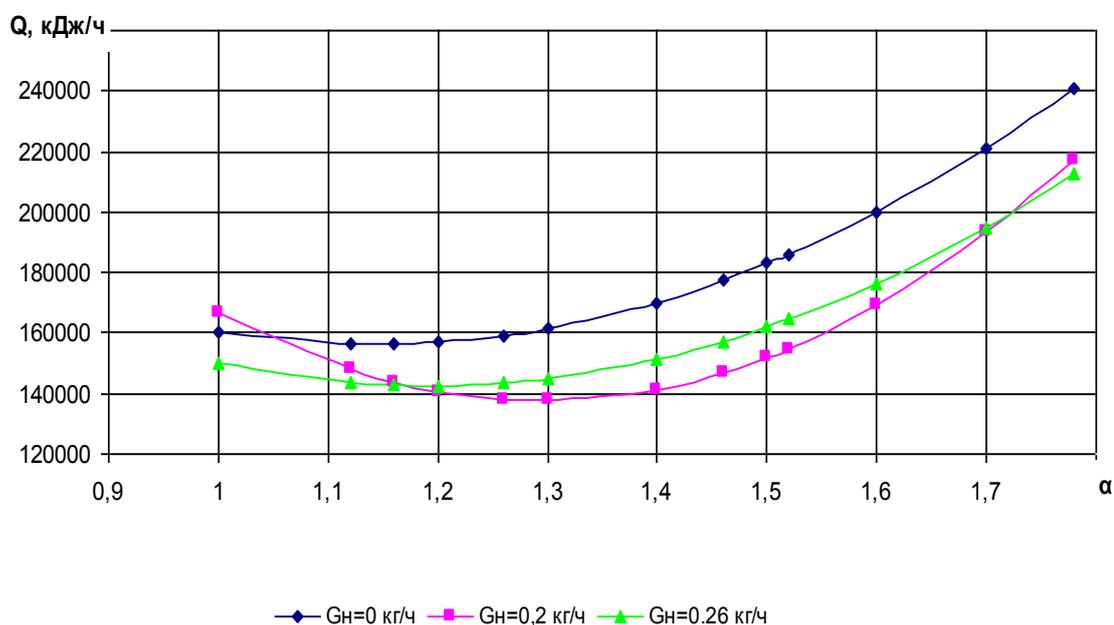


Рисунок 4.3 - Количество теплоты, подведенной с метановодородной смесью для режима холостого хода

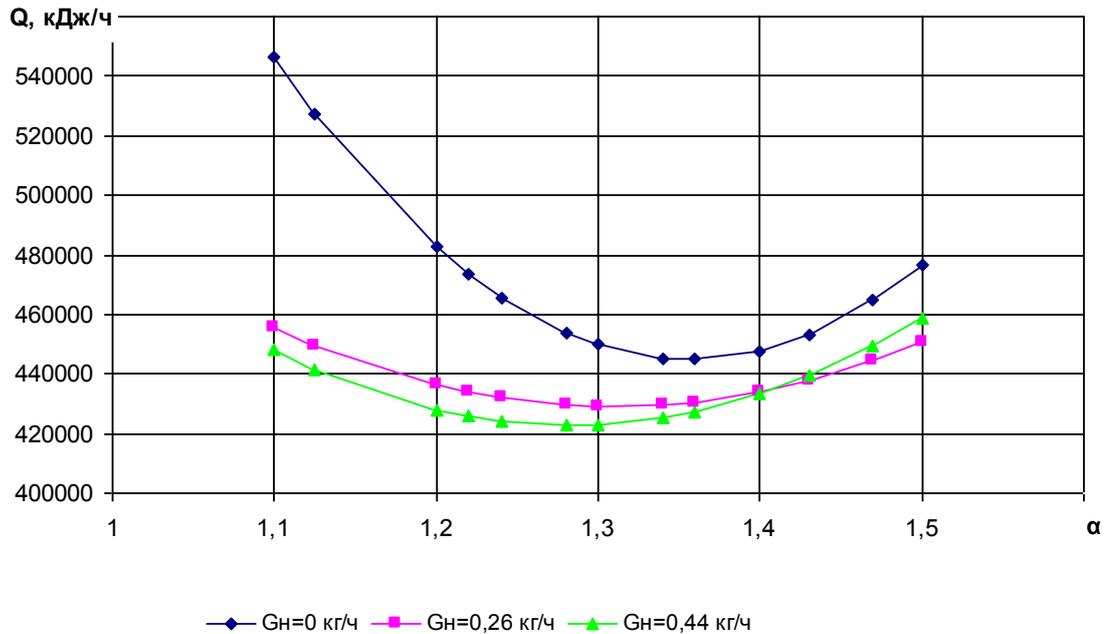


Рисунок 4.4 - Количество теплоты, подведенной с метановодородной смесью для режима $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 15 гр.п.к.в

Как видно из рисунков, количество подведенной теплоты для газового двигателя при добавках водорода не одинаково. Поэтому, уравнение расхода топлива, выведенное для дизельного двигателя, в данном случае неактуально, и требует уточнения.

Количество теплоты, подведенное в двигатель со смесью топлив, рассчитывается как сумма теплот, подведенных вместе с каждым из топлив.

Как можно заметить, количество теплоты, подведенное со смесью газового топлива и водорода, по значению отличается от такового для чистого газового топлива, что позволяет предположить наличие эффекта более полного использования подведенной теплоты, что позволяет говорить о наличии активации горения.

Введем переменную для обозначения этого эффекта:

$$k = \frac{Q_{см}}{Q_T}; \quad (4.1)$$

где $Q_{см}$ – количество теплоты, подведенное в двигатель со смесью топлив;

Q_m – количество теплоты, подведенное в двигатель вместе с основным топливом при отсутствии добавок водорода.

Тогда формула (4.1) будет выглядеть:

$$k Q_m = G_m H_{u_m} + G_H H_{u_H}, \quad (4.2)$$

и, после некоторых преобразований, примет свой окончательный вид:

$$G_m^H = k G_T - G_H (H_{u_H} / H_{u_T}), \quad (4.3)$$

Также, теплота, подведенная в двигатель со смесью топлив, может быть представлена через расход смеси топлив и ее удельную массовую теплоемкость:

$$Q_{см} = G_{см} H_{u_{см}}, \quad (4.4)$$

где $G_{см}$ – расход смеси топлив, определяется как сумма расходов каждого компонента

$H_{u_{см}}$ – удельная массовая теплотворная способность смеси топлив, вычисляемая как:

$$H_{см} = m H_{u_T}^H + (1-m) H_{u_H}, \quad (4.5)$$

где m - массовая доля топлива в смеси, определяются как:

$$m = \frac{G_T^H}{G_{см}} = \frac{G_T^H}{G_T^H + G_H};$$

Тогда

$$Q_{см} = (G_T^H + G_H) (m H_{u_T}^H + (1-m) H_{u_H}); \quad (4.6)$$

После проведения преобразований, уравнение приобретает вид:

$$G_T^H = \frac{m \cdot Q_{см}}{m \cdot H_{u_T}^H + (1-m) \cdot H_{u_H}};$$

или

$$G_T^H = G_T \cdot k \cdot \frac{m \cdot H_T}{m \cdot H_{u_T}^H + (1-m) \cdot H_{u_H}}; \quad (4.7)$$

Из экспериментальных данных видно, что в случае добавки водорода в дизельное топливо коэффициент $k = 1$, что обеспечивает равенство суммарного количества теплоты, подведенного в двигатель как при работе на чистом дизельном топливе, так и при работе на смеси топлива с водородом.

При использовании метана, коэффициент k не равен единице и на рассматриваемых режимах варьируется в пределах от 0,8 до 0,97, (см. таблицы 4.7 и 4.8).

Таблица 4.7 – Значение коэффициента k для режима холостого хода

α	Gн		
	0	0,2	0,26
1	1	1,042769	0,937227
1,12	1	0,946854	0,919986
1,16	1	0,919967	0,914596
1,2	1	0,89624	0,909502
1,26	1	0,86711	0,902544
1,3	1	0,852203	0,898429
1,4	1	0,830768	0,890178
1,46	1	0,828125	0,886665
1,5	1	0,830161	0,884905
1,52	1	0,832212	0,884191
1,6	1	0,846414	0,882363
1,7	1	0,874741	0,882066
1,78	1	0,903032	0,883067

Таблица 4.8 – Значение коэффициента k для режима $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 15 гр.п.к.в

α	Gн		
	0	0,26	0,44
1	1	0,833878	0,819961
1,12	1	0,852417	0,837024
1,16	1	0,904213	0,886665
1,2	1	0,916396	0,898958
1,26	1	0,927615	0,910613
1,3	1	0,946614	0,931506
1,4	1	0,954146	0,940509
1,46	1	0,964782	0,955118
1,5	1	0,967753	0,960568
1,52	1	0,968855	0,96752
1,6	1	0,965504	0,969226
1,7	1	0,95582	0,966968
1,78	1	0,945048	0,962119

Значение $k = 1,042769$ в таблице 4.8 является ложным и выпадает из массива данных.

Величина k является сложной зависимостью. Ее значение зависит от большого количества факторов, таких как расход водорода, состав смеси и

режима работы двигателя. Определить величину k целесообразно в виде эмпирической зависимости..

Рассмотрим полученное уравнение применительно к системе «дизель+водород»

Теплотворные способности метана и водорода равны, соответственно, $H_{из} = 42,5$ и $H_{ин} = 120,736$ мДж/кг. Подставив эти значения в уравнение 4.2 получим:

$$G_T^H = G_T \cdot k \cdot \frac{m \cdot 42,5}{m \cdot 42,5 + (1 - m) \cdot 120,736}; \quad (4.8)$$

Как уже установлено, k в случае работы двигателя на смеси дизельного топлива и водорода равно 1, поэтому получаем окончательную формулу:

$$\frac{G_T^H}{G_T} = \frac{m \cdot 42,5}{m \cdot 42,5 + (1 - m) \cdot 120,736} \quad (4.9)$$

Стоящее в левой части уравнения отношение расходов топлива при добавке водорода и без таковой, очевидно, будет стремиться к 1 при условии, что переменная m , описывающая количество топлива в топливоводородной смеси, также будет стремиться к 1.

Однако поведение $\frac{G_T^H}{G_T}$ не будет подчиняться линейной зависимости

(рисунок. 4.5)

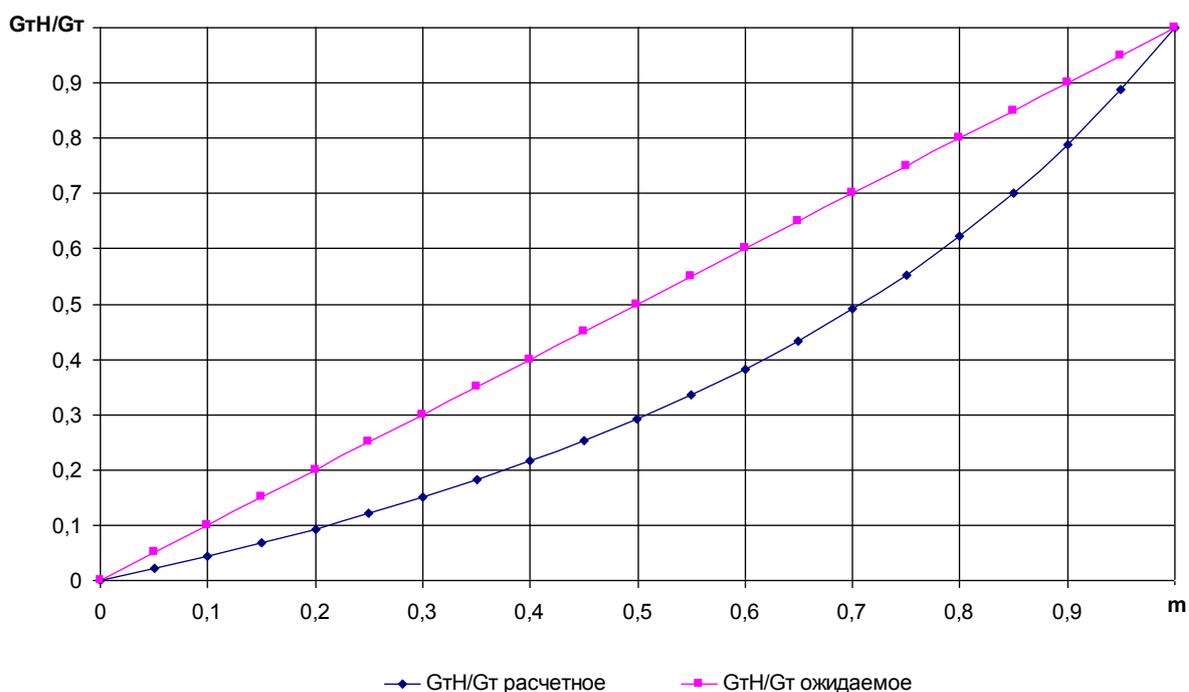


Рисунок 4.5 - Поведение ожидаемого и рассчитанного отношения расходов топлива.

Подобное поведение объясняется разностью теплотворных способностей дизельного топлива и водорода. Если следовать графику на рисунке 23, максимальный эффект экономии топлива должен достигаться при добавке водорода равной 30% от массового расхода смеси. Такой результат совпадает с результатами современных исследований

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

- установлена зависимость влияния добавок водорода на экономические показатели двигателя, которая позволяет определить расход топлива при добавке водорода в зависимости от расхода водорода:

$$G_m^H = k G_T - G_H (Hu_H / Hu_T);$$

- зависимость позволяет учитывать способ формирования ТВС и эффективность применения водорода за счет присутствия в ней коэффициента k ;
- установлено, что коэффициент k имеет сложную функциональную зависимость и изменяется в диапазоне от 0,8 до 1, в частности:

- для двигателей с гетерогенным смесеобразованием (дизельные двигатели) $k=1$;
- для двигателей с гомогенным смесеобразованием (работающие на газовом топливе двигатели) $k = 0,8 \dots 0,97$ для исследованных диапазонов режимов и добавок.
- экспериментально установлено, что наибольший эффект добавка водорода оказывает на двигатели с гомогенным способом формирования ТВС.

Такой вывод может быть существенен для определения направления дальнейших исследований в области добавок водорода для повышения топливной экономичности двигателя. Поскольку, согласно данному исследованию, добавка водорода в гомогенную топливовоздушную смесь, имеет больший эффект, чем добавление его в гетерогенную, можно сказать, что это направление более перспективное и интересное для исследования.

4.1 Эффективность системы ДВС-ГСГ.

При рассмотрении данного вопроса с точки зрения экономичности следует разделить его на два, а именно:

Эффективность преобразования энергии в ДВС

Эффективность конверсии топлива на водородосодержащий газ.

Обращаясь к первому из них следует рассматривать повышение эффективности за счет обеднения смеси при поддержании процесса сгорания в ДВС в пределах вблизи ВМТ. При этом стимулирующим к этому является процентная добавка водородосодержащего газа с более высокой скоростью сгорания чем у основного вида топлива. В то же самое время скорость сгорания должна поддерживаться на границе баланса между приемлемой продолжительностью сгорания и с другой стороны обратным влиянием избыточной скорости горения на эффективность – возрастанием потерь тепла вследствие высокой турбулентности заряда в стенку камеры сгорания.

Большинство конвертируемых топлив позволяют получить на выходе из генератора синтез газа смесь содержащую водород, оксид углерода, азот

20/20/55 и сопутствующие дополнительные балластные составляющие – вода, продукты неполной конверсии.

Рассмотрим влияние СО и водорода на изменение скорости сгорания нормального бутана от процентной добавки горючего газа рисунок 4.6

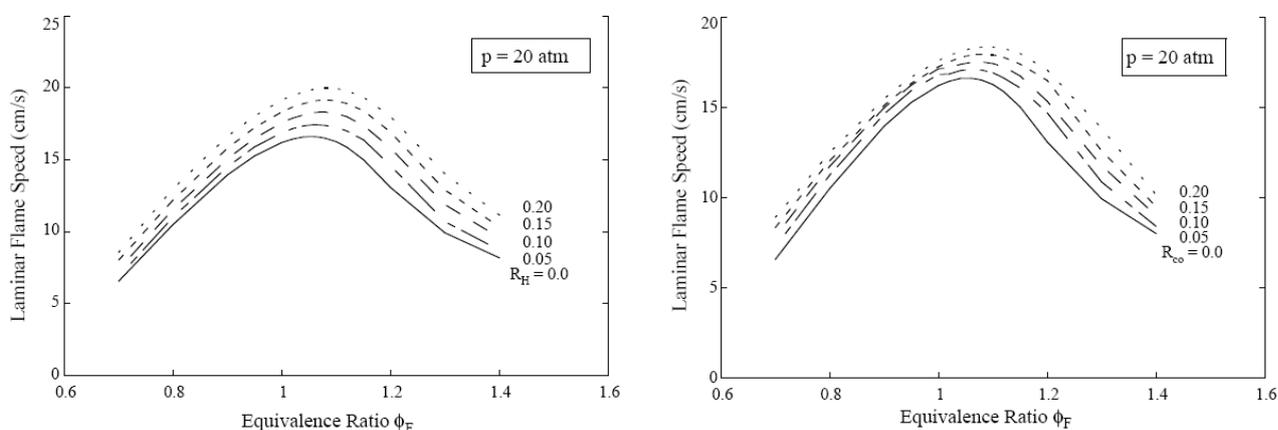


Рисунок 4.6 - Влияние СО и водорода на изменение скорости сгорания нормального бутана.

Как видно, из рисунка горючие газы существенно повышают скорости ламинарного горения, особенно в области стехиометрического состава смеси. Поэтому, применительно к эффективному горению в двигателе, уменьшение скорости горения основного топлива повлечет за собой возрастание процентного содержания водородосодержащего газа в горючей смеси. А использование чистой смеси водородосодержащего газа в смеси с окислителем при коэффициенте избытка воздуха отличным от эффективного вызовет ухудшение, вследствие повышенной теплоотдачи.

Поэтому следует учитывать тот факт что каждому нагрузочному режиму, составу смеси и оборотам двигателя соответствует определенный эффективный состав смеси основного топлива с водородосодержащим газом. При этом на практике было получено, что получаемые путем конверсии углеводородного топлива смеси в процентном соотношении водород-оксид углерода – азот позволяют обеспечить устойчивую работу ДВС на сверхбедных составах, а

количество топлива конвертируемого в водородосодержащий газ составляет 40-50%.

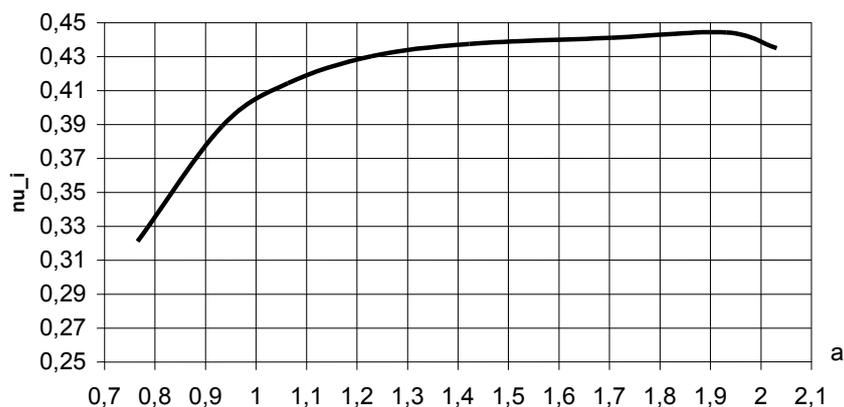


Рисунок 4.7 – Изменение индикаторного КПД от состава смеси

На рисунке 4.7 представлена характерная зависимость изменения индикаторного КПД ДВС от состава смеси. При этом видно, что максимальный прирост в эффективности следует ожидать в области богатых смесей, когда создание условий для обеднения смеси приводит к росту КПД. Процентное возрастание в КПД при переходе в работе ДВС от $\alpha=0.8$ к $\alpha=1.0$ составляет 22.5%, а от 1.0 к 2.0 – 9.8%

Однако, работа двигателя на богатых смесях происходит в диапазоне нагрузочных режимов близких к холостым, в силу невозможности устойчивой работы на бедных составах. Поэтому наибольший прирост в эффективности следует относить к малым нагрузкам при низких оборотах. В то же самое время, само улучшение рабочего процесса приводит к обратному влиянию на прирост в эффективности. В случае постоянной нагрузки на двигателе, возрастание в индикаторном КПД приведет к уменьшению требуемого количества горючей смеси это в свою очередь вызовет закрытие дроссельной заслонки а как следствие возрастание механических потерь. Поэтому повышение в эффективном КПД будет характеризоваться меньшими процентными изменениями.

Эффективность генератора синтез газа.

Значительное влияние на эффективность всей системы оказывает сама конверсия углеводородного топлива, а именно поддерживаемое соотношение окислитель-горючее в процессе реакции, тепловое состояние конвертера, а также состав получаемой смеси водородосодержащего газа. Многофакторность и как следствие широкий диапазон возможного изменения в составе накладывает в свою очередь дополнительные потери во всей системе. Не мало важное значение в снижении эффективности конверсии оказывает влияние значительный диапазон расходов через генератор соответствующий изменению нагрузки на ДВС, и как неизбежность повышение относительных потерь в конверсии на рассеивание тепла при малых расходах. Так в практике было получено 15-25 % ухудшение в эффективности системы генератор синтезгаза-ДВС при работе только на конвертированной водородосодержащей смеси.

Известно, что степень возможного обеднения топливо-воздушной смеси, поступающей в ДВС для стабильной его работы, определяется величиной добавляемого водородосодержащего газа к основному углеводородному топливу.

В работах [31, 32, 33] исследовался одноцилиндровый двигатель с искровым зажиганием при его работе на бензине и добавке искусственно приготовляемой смеси, состоящей из водорода, оксида углерода и азота с соответствующим содержанием газов $H_2/CO/N_2$ (0.21/0.24/0.55). При этом величина добавляемого (подаваемого) газа в процентном выражении изменялась от нуля до 100%. На основании результатов данной работы получена зависимость, представленная на рис.3, величины ψ , необходимой для устойчивой работы ДВС при определенном коэффициенте избытка воздуха, которая определяется:

$$\psi = \frac{G_{H_2}}{G_{H_2} + G_B}, \quad (4.10)$$

где G_{H_2} – масса водорода, содержащегося в смеси $H_2/CO/N_2$ и добавляемой в топливо-воздушную смесь поступающей в ДВС;

G_B – массовый расход бензина ДВС.

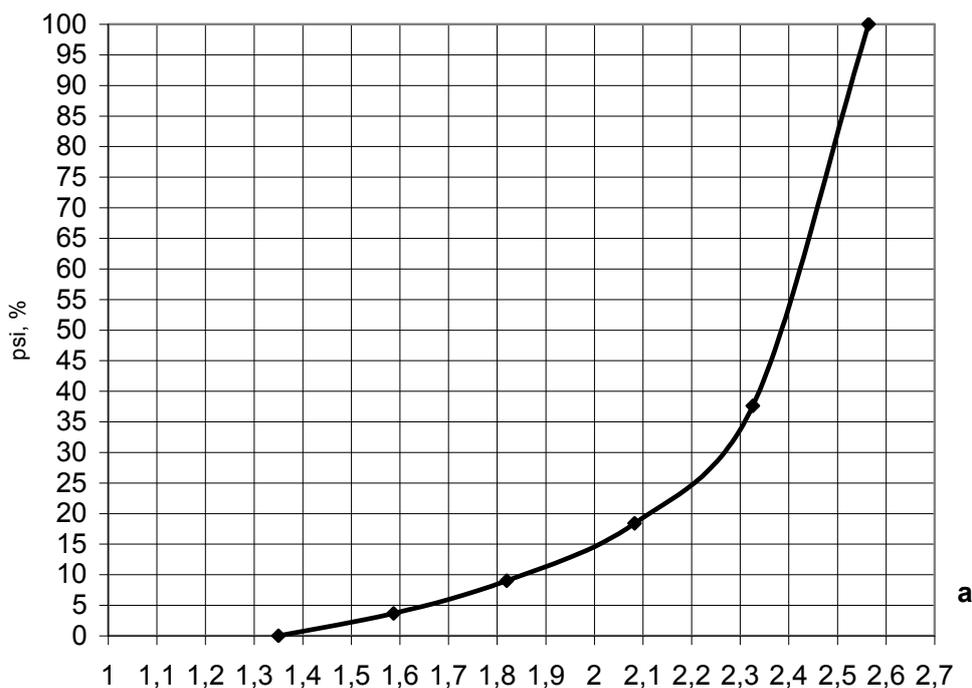


Рисунок 4.8 – Зависимость показателя ψ от коэффициента избытка воздуха.

Вид зависимости соотношения ψ для данной смеси $H_2/CO/N_2$, согласуется с зависимостью полученной для чистого водорода, при этом видно, что для работы двигателя на $\alpha=2.2$ необходимо до 30% массового содержания водорода в подаваемом топливе в ДВС.

В настоящее время проводятся работы по созданию генератора синтез-газа для конверсии углеводородных топлив – бензина и природного газа. Величина получаемого массового количества водорода и оксида углерода из единицы массы данных топлив различна. При этом, содержание водорода изменяется в зависимости от условий работы генератора синтез-газа. В практике получено, что выход водорода из природного газа составляет 20% по массе исходного топлива, а по бензину данная величина составляет 7 - 10%, или в среднем 9%. На основании этих показателей и зависимости ψ , представленной на рисунок 4.8, была получена зависимость величины конвертируемого топлива для работы двигателя при данном α , которая представлена на рисунке 4.9. Ввиду различного

содержания окиси углерода в смесях, получаемых из бензина и природного газа, его влияние на пределы устойчивой работы ДВС не учитывалось, в рассмотрение принималось только массовое количество водорода.

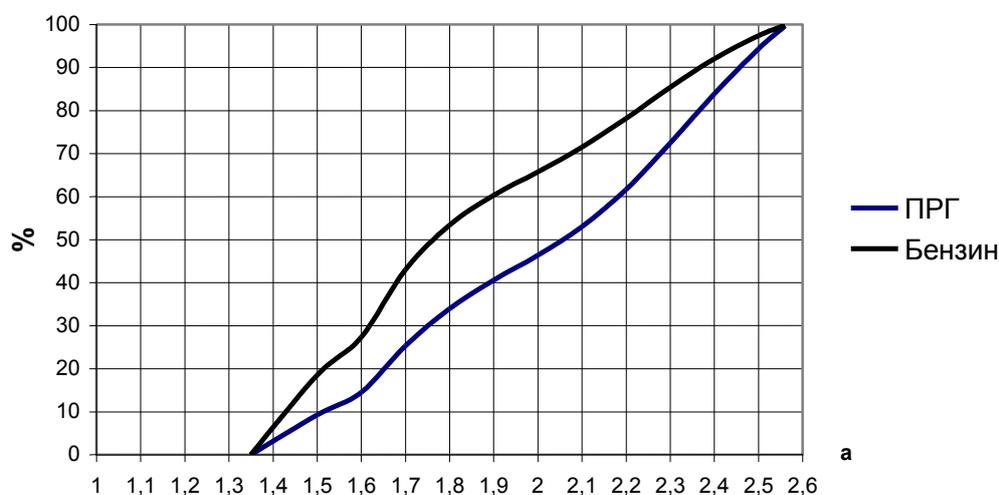


Рисунок 4.9 – Доля конвертируемого топлива при обеднении

Полученные результаты определенно показывают о значительно большем требуемом массовом расходе бензина по сравнению с природным газом для получения необходимого количества водорода. При последующем анализе эффективности системы генератор синтез газа-ДВС получена зависимость изменения суммарного индикаторного КПД системы, которая определялась исходя из 15% потери тепла топлива в генераторе и исходной эффективности ДВС согласно зависимости рисунок 4.7. Вид зависимости представлен на рисунке 4.10.

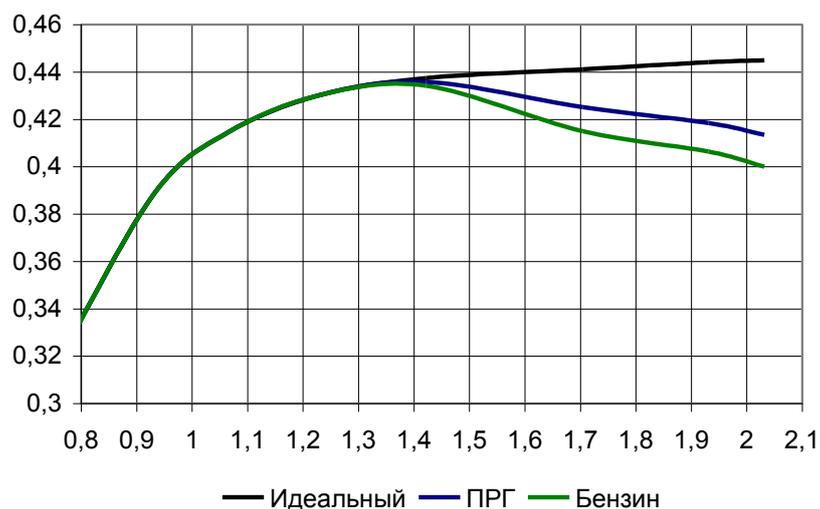


Рисунок 4.10 - Изменение суммарного индикаторного КПД системы генератор синтез газа –ДВС.

Характер зависимости свидетельствует о значительном влиянии эффективности генератора синтез-газа на суммарную эффективность системы. При этом видно, что для конверсии углеводородного топлива предпочтителен природный газ. Кроме того, при анализе не бралось в рассмотрение изменение эффективности рабочего процесса в ДВС в случае замены искусственной смеси $H_2/CO/N_2$ на смесь получаемую из генератора синтез-газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертации были получены следующие результаты:

- изучено состояние вопроса на сегодняшний день по теме использования водородосодержащих газов в качестве топлива и добавок к традиционному моторному топливу и установлен уровень развития и степени проработанности водородной тематики. Было выявлено отсутствие систематизированной и полной информации по теме применения водорода с целью улучшения экономических параметров;

- проведен анализ возможности повышения экологических и экономических показателей гибридной установки путем частичной замены основного топлива синтез газов.

- предложена схема гибридной установки реализующий принцип использования синтез-газа.

- получены и обработаны результатов исследования влияния добавок водородосодержащих газов на экономические и экологические показатели ДВС при разных способах смесеобразования;

- установлена зависимость влияния добавок водородосодержащих газов на экономические и экологические показатели ДВС при разных способах смесеобразования:

- установлена зависимость влияния добавок водорода на экономические показатели двигателя, которая позволяет определить расход топлива при добавке водорода в зависимости от расхода водорода:

$$GH_m = k GT - G_n(H_uH / H_uT);$$

- зависимость позволяет учитывать способ формирования ТВС и эффективность применения водорода за счет присутствия в ней коэффициента k ;

- установлено, что коэффициент k имеет сложную функциональную зависимость и изменяется в диапазоне от 0,8 до 1, в частности:

- для двигателей с гетерогенным смесеобразованием (дизельные двигатели) $k = 1$;

- для двигателей с гомогенным смесеобразованием (работающие на газовом топливе двигатели) $k = 0,8...0,97$ для исследованных диапазонах режимов и добавок.

- экспериментально установлено, что наибольший эффект добавка водорода оказывает на двигатели с гомогенным способом формирования ТВС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Золотницкий В.А. Новые газовые системы автомобилей. – М.: «Издательский дом Третий Рим», 2003.
2. Лютко В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: МАДИ, 2000 – 2 т.
3. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. Изд. 2-е – перераб. – М.: Машиностроение. – 1981.
4. Хитрин Л.И. Физика горения и взрыва / Л.И. Хитрин; М.: - 1955.
5. Асмус Т.У. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т.У. Асмус, К. Бргннакке и др.; под ред. Д.Хиллиарада, Дж.С. Спрингера; перевод с англ. Васильева; под ред. А.В. Кострова. – М.: Машиностроение, 1988.
6. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени; перевод с англ. Ю.Ф. Дитикина. – Машиностроение. – 1981.
7. Don Karner, James Francfort. Advanced Vehicle Testing Activity high-percentage HYDROGEN / CNG blend on FORD F -150. - operating summary. U.S. Department of Energy/ Idaho, 2003.
8. Don Karner, James Francfort. Advanced Vehicle Testing Activity low-percentage HYDROGEN / CNG blend on FORD F -150. - operating summary. U.S. Department of Energy, Idaho, 2003.
9. Анохин В.А., Дерюжкина В.И., Перегузов В.А., Меньшов В.И. Научные основы каталитической конверсии углеводородов. Киев: Наукова Думка, 1977. С. 63.
10. Vermeiren W.J.M., Blomsma E., Jakobs P.A. //Catal. Today. 1992. V. 13. n. 2/3. P.427-436.
11. Choudhary V.R., Rajput A.M., Prabhakar B. //Catal. Lett. 1992. V. 15 n. 4. P. 363-370.

12. Yamamoto R., Morka Y., Suzuki K. et al. //J. Chem. Soc. Japan. Ind. Chem. Soc. 1957. V. 60. n. 8. P. 1020.
13. Slagtern A., Miradatos C., Swaan H. et. al. //Abst. V European workshop on methane activation. Limerib, 1997
14. Справочник азотчика /под ред. Е.Я.Мельникова. М.: Химия, 1986. 512 с.
15. S.Shen, C.Li, Ch.Yu. Mechanistic Study of Partial Oxidation of Methane to Syngas over a Ni/Al₂O₃ Catalyst.// Natural Gas Conversion V. Studies in Surface Science and Catalysis.,1998 Elsevier Science B.V. v.119, p.765 –770.
16. M.A.S. Al-Baghdadi, Hydrogen-ethanol blending as an alternative fuel of spark ignition engines. Renewable Energy, V. 28, p. 1471-1478, 2003
17. E. Jobson, Future challenges in automotive emission control. Topics in Catalysis, V. 28, p. 191-199, 2004
18. ACEA Statement on the Adoption of SCR Technology to Reduce Emissions Levels of Heavy-Duty Vehicles 30/06/2003
19. M.Fathi, R.H. Hofstad, T. Sperle, O.A.Rokstad, A.Holmen. Partial oxidation of methane to synthesis gas at very short contact times.// Catalysis Today 42, 1998, p. 205-209.
20. S.S.Bharadwaj and L.D. Schmidt. Synthesis gas formation by catalytic oxidation of methane in fluidized bed reactors.// Journal of Catalysis. 1994,v.146,p.11-21.
21. J. Yaying, L. Wenzhao, X. Hengyong, Y. Chunying.// Partial oxidation of methane to syngas in fluidized bed reactor. Cuihua Xuebao, 21(2), 2000,p. 97-98.
22. P. Zhi-yong, D. Chao-yang, S. Shi-kong.// New two-stage process for catalytic oxidation of methane to synthesis gas. Ranliao Huaxue Xuebao, 28(4), 2000, p. 348-351.
23. J.D. Korchnak, M. Dunster and A. English. Patent Cooperation Treaty W090/06282, PTC/US89/05369, assigned to Davy McKee Corporation.
24. M.F.M. Zwinkels, S.G.Jaras, P.G.Menon and T.A.Griffin//Catal. Rev.-Sci. Eng., 35 (1993), p.319.

25. D.A.Hickman and L.D. Schmidt.// Science. 259 1993,p.343.
26. J.P.Gomez, J.M. Jimenez, S. Vic, J. Lezaun, P.Terrerros, M/A/Pena and J.L.G Fierro. 4th International Natural gas Conversion Sympozium, South Africa 1995.
- 27.I. Theophilos, V. Xenophon E.// Development of a novel heat-integrated wall reactor for the partial oxidation of methane to synthesis gas. Catal. Today.46(2-3), 1998, p.71-81.
28. C.Y.Tsai, Y.H. Ma, W.R.Moser and A.Dixon. Modeling and Simulation of a Nonizothermal Catalytic Membrane Reactor. //Chem. Eng. Comm. 1995,v. 134,p. 107-132.
29. U.Balachandran et al. Ceramic membrane reactor for converting methane to syngas.//Catalysis Today., 36, 1997, p.265-272.
- 30.Патент № 2062402 РФ. 1994
- 31.Engine Performance and Emission Near the Dilute Limit with Hydrogen Enrichment Using an On-Board Reforming Strategy Ather A. Quader, John E. Kirwan, M. James Grieve /Delphi USA/, SAE 2003-01-1356
32. Combustion Characteristics of H₂-CO-CO₂ Mixture in an IC-Engine, Toshio Shudo, Yasuo Nakajima, Koichiro Tsuga, SAE 2001-01-0252
33. Experimental Evaluation of SI Engine Operation Supplemented by Hydrogen Rich Gas from a Compact Plasma Boosted Reformer, J.B. Green and e.g., SAE 2000-01-2206
34. ГОСТ 13822-82 Электроагрегаты и передвижные электростанции, дизельные. Общие технические условия.
- 35.Русаков М.М. Пределы стабильного сгорания обедненных бензовоздушных смесей в ДВС при различных способах интенсификации / М.М. Русаков и др.; Сборник трудов XI симпозиума по горению и взрыву. – 1996.
36. Техническое описание: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа: <http://avrora->

arm.ru/data/armatura01/viessmann/10/Technische%20Beschreibung%20VITO
BLOC%20200%20EM-18_36.pdf (Дата обращения: 18.02.2017).

37. О создании и деятельности технологической платформы «Малая распределенная энергетика» [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа: <http://ds-energy.ru/platforma/memorandum> (Дата обращения: 18.02.2017).

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Результаты испытания газового двигателя

Таблица А1 – Первичные результаты экспериментальных исследований

n , мин ⁻¹	M_e , кг·м	N_e , кВт	T_0 возд., С	Q возд	P_k кг/см ²	$\varphi_{др}$, %	P_e , кг/см ²	Q_a , кг/ч	G_b , кг/ч	T_{TKP} , прав	T_{TKP} , лев	УОЗ, град	α_I	H_2 , кг/ч	α (с H_2)	CH, ppm	NO _x , ppm	CO, ppm
1500	13.6	21	32	212	0.09	17.9	1.46	9.5	254	530	503	15	1.59	0	1.59	1656	46	904
1500	13.6	21	32	175	0.05	16.0	1.46	7.9	211	506	484	15	1.6	0.26	1.493	364	13.5	657
1500	13.6	21	32	256	0.14	19.7	1.46	11	307	574	539	10	1.6	0	1.601	2436	20	780
1500	13.6	21	33	202	0.08	17.4	1.46	9	243	551	519	10	1.61	0.26	1.52	289	40	488
1500	110	170	32	705	0.81	47.5	11.8	35	848	600	588	15	1.45	0	1.445	667	417	445
1500	110	170	32	681	0.77	45.9	11.8	34	820	595	583	15	1.45	0.26	1.425	545	922	434
1500	55	84.8	34	369	0.28	24.5	5.88	19	444	581	568	15	1.39	0	1.389	423	412	430
1500	55	64.8	33	354	0.25	24.0	5.88	18	426	569	555	15	1.39	0.26	1.362	326	849	453
1500	27.5	42.3	34	237	0.11	18.9	2.94	12	285	543	523	15	1.4	0	1.4	436	243	570
1500	27.5	42.3	34	215	0.09	18.1	2.94	11	259	539	517	15	1.4	0.26	1.339	313	601	637
1500	27.5	42.3	35	229	0.11	18.6	2.94	12	276	559	536	10	1.4	0.26	1.334	233	335	569
1500	55	84.8	35	374	0.31	24.0	5.88	19	450	599	585	10	1.39	0.26	1.358	261	472	393
1500	103	159	35	707	0.84	46.7	11	35	850	637	615	10	1.44	0.26	1.415	582	403	365
1500	11	170	34	665	0.73	46.4	11.8	33	800	592	578	15	1.44	0.44	1.409	487	1203	406
1500	55	84.8	35	344	0.24	23.2	5.88	18	413	586	572	15	1.39	0.44	1.324	283	1473	406
1500	27.5	42.3	35	206	0.09	17.5	2.94	11	248	550	532	15	1.39	0.44	1.288	230	967	546
2200	8.5	19.1	36	213	0.11	17.3	0.91	11	256	573	557	18	1.34	0	1.335	329	209	771
2200	8.5	19.1	36	193	0.1	16.4	0.91	10	232	571	562	18	1.34	0.44	1.237	131	807	833
2200	21.4	48.4	35	327	0.21	21.4	2.29	17	393	590	573	18	1.4	0	1.408	442	228	537
2200	21.4	48.4	35	299	0.18	20.5	2.29	15	359	587	571	18	1.4	0.44	1.33	259	828	690
2200	42.4	95.7	35	489	0.45	24.7	4.53	25	588	616	599	18	1.4	0	1.398	385	385	545
2200	42.4	95.7	35	466	0.41	24.3	4.53	24	561	613	599	18	1.41	0.44	1.359	253	933	556
2200	84.7	191	35	849	0.99	31.0	9.06	44	1021	635	620	18	1.39	0	1.389	218	944	567
2200	84.7	191	35	838	0.94	31.4	9.06	43	1008	630	612	18	1.41	0.44	1.379	140	1100	557

Таблица А2 –Результаты экспериментальных исследований

n , мин ⁻¹	M_e , кг·м	N_e , кВт	T_0 возд., С	Q возд	P_k кг/см ²	$\varphi_{др}$, %	P_e , кг/см ²	Q_2 , кг/ч	G_e , кг/ч	T_{TKP} , прав	T_{TKP} , лев	УОЗ, град	α_1	H_2 , кг/ч	α (с H_2)	СН, ppm	NO_x , ppm	СО, ppm
1500	13.6	21	32	165	0.06	15.3	1.46	9	198	527	512	15	1.31	0	1.308	327	210	697
1500	13.6	21	33	179	0.06	16.2	1.46	9.1	215	526	508	15	1.41	0	1.405	518	129	731
1500	13.6	21	33	187	0.07	16.3	1.46	9.1	225	528	509	15	1.47	0	1.47	606	95	730
1500	13.6	21	34	204	0.08	17.4	1.46	9.7	246	530	506	15	1.51	0	1.508	1140	59	804
1500	13.6	25.5	35	145	0.05	14.8	1.77	8	174	516	509	15	1.3	0.26	1.217	216	625	749
1500	13.6	21	35	145	0.05	14	1.46	7.9	174	507	498	15	1.3	0.26	1.231	213	515	736
1500	13.6	21	35	153	0.05	14.4	1.46	7.9	184	506	496	15	1.38	0.26	1.302	240	444	732
1500	13.6	21	35	160	0.05	14.9	1.46	7.9	193	517	494	15	1.44	0.26	1.366	266	327	715
1500	13.6	21	36	171	0.05	15.7	1.46	8.1	206	505	486	15	1.52	0.26	1.424	340	180	670
1500	13.6	21	36	136	0.05	13.4	1.46	7.8	164	505	501	15	1.25	0.44	1.127	197	1026	1260
1500	13.6	21	37	139	0.05	13.8	1.46	7.5	168	500	496	15	1.34	0.44	1.196	159	843	806
1500	13.6	21	37	149	0.05	14.3	1.46	7.4	179	495	489	15	1.45	0.44	1.29	185	611	710
1500	13.6	21	37	155	0.05	14.8	1.46	7.4	186	497	484	15	1.5	0.44	1.341	211	453	702
1500	13.6	21	37	192	0.02	16.8	1.46	11	231	562	544	10	1.3	0	1.296	288	83	572
1500	13.6	21	37	160	0.02	15.1	1.46	8.8	192	545	529	10	1.29	0.26	1.227	163	245	584
1500	13.6	21	37	162	0.02	15.1	1.46	8.3	195	508	500	20	1.39	0	1.397	506	391	805
1500	13.6	21	37	151	0.02	14.6	1.46	7.8	182	481	477	20	1.4	0.26	1.303	315	731	896

Таблица А3 –Результаты экспериментальных исследований

n , мин ⁻¹	M_e , кг·м	N_e , кВт	T_0 возд., С	Q возд	P_k кг/см ²	$\varphi_{др}$, %	Q_e , кг/ч	G_b , кг/ч	T_{TKP} , прав	T_{TKP} , лев	α_1	H_2 , кг/ч	α (с H ₂)	CH, ppm	NO _x , ppm	CO, ppm
800	0.1	0.08	34	67	0	8.4	3.4	81	420	416	1.41	0	1.41	1039	34	845
800	0.1	0.08	34	45	0	6.3	2.3	55	345	338	1.4	0.16	1.25	214	40	1573
800	0.1	0.08	34	44	0	6.3	2.3	53	328	326	1.4	0.26	1.12	355	45	1695
800	0.1	0.08	34	44	0	6.3	2.2	53	315	318	1.44	0.26	1.16	479	44	1482
800	0.1	0.08	33	78	0	9.4	3.7	94	378	371	1.49	0	1.5	1.375	27	882
800	0	0	33	47	0	6.6	2.3	57	330	332	1.5	0.16	1.29	126	36	829
800	0	0	33	46	0	6.3	2.2	55	316	318	1.49	0.26	1.21	129	39	1271
800	0	0	33	104	0	11.7	4.4	125	373	368	1.69	0	1.68	4102	14	1110
800	0	0	33	59	0	6.8	2.5	71	343	346	1.68	0.16	1.5	304	25	1063
800	0	0	33	56	0	7.1	2.4	68	333	333	1.7	0.26	1.39	223	24	699
800	0	0	33	119	0	12	4.8	143	375	371	1.76	0	1.76	5626	11	1017
800	0	0	33	57	0	5.4	2.3	69	361	358	1.78	0.16	1.57	597	23	1268
800	0	0	33	59	0	7	2.4	71	339	337	1.78	0.26	1.45	1188	26	1701

ПРИЛОЖЕНИЕ Б - ПРОДОЛЖЕНИЕ

Испытательный цикл ESC без добавки водорода

№	Режим	п. об/мин	Re, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное		
1	XX	600	0	0	0	72	82	1.4	37	31	1	263	262	1.53		0.3													
2	A-100	1180	1236	193.3349	1203.617	70	81	2.4	33	32	30	472	480	33.52	748.26	2	70	200	660			173.3779	1.49817398	1.456232	1474.88	1714.88	0.357192649		
3	B-50	1450	1330	236.4193	1197.774	77	88	2.8	35	33	14	388	382	21.63	758.91	1	136	179	450			176.9382	1.93290261	1.876534	1474.16	1811.72	0.342736352		
4	B-75	1450	958	184.1379	932.9004	77	91	2.7	37	33	32	439	445	32.14	925.64	1.2	49	190	490			174.5431	1.876534	1.876534	1474.16	1894.16	0.348744616		
5	A-50	1180	622	97.29312	605.7036	77	92	2.1	37	33	11	406	410	16.91	548.02	1.2	100	185	560			173.8047	2.17503641	2.057565	1474.04	1344.04	0.335091674		
6	A-75	1180	928	145.1576	903.6864	77	91	2.1	36	33	19	445	450	24.94	639.57	2	60	195	612			171.8133	1.72109708	1.656956	1097.36	1817.36	0.343756286		
7	A-25	1180	330	51.61854	321.354	73	89	2.2	35	33	6	315	315	9.76	483.66	0.6	530	270	438			189.0794	3.32586093	3.026488	429.44	1269.44	0.278403792		
8	B-100	1450	1230	236.4193	1197.774	77	90	2.8	35	33	39	464	473	41.25	1063.49	1.9	56	166	540			174.4782	1.7303071	1.690736	1815	2275	0.342595241		
9	B-25	1450	336	64.58282	327.1968	74	91	2.7	37	34	4	336	339	12.99	639.26	0.5	679	350	340			201.1371	3.30279875	3.074311	571.56	1651.56	0.263177266		
10	C-100	1730	1162	266.4784	1131.556	73	88	3.3	36	33	62	450	457	50.69	1463.72	2	65	148	410			190.2218	1.9379807	1.90176	2230.36	3430.36	0.313989881		
11	C-25	1730	336	77.05399	327.1968	73	92	3.3	39	34	13	336	334	17.08	840.39	0.5	708	390	260			221.6628	3.30222561	3.125556	751.52	2071.52	0.241511544		
12	C-75	1730	760	174.2888	740.088	74	90	3.3	38	33	30	400	399	31.41	1101.76	1	90	140	350			180.2181	2.35414276	2.283942	1382.04	2822.04	0.316273407		
13	C-50	1730	619	141.9536	602.7822	74	91	3.3	38	33	19	378	380	26.62	999.39	0.8	165	137	350			187.526	2.51965268	2.43147	1171.28	2731.28	0.296171388		
																					CO, г/кВт ч	CH, г/кВт ч	NOx, г/кВт ч	Pt, г/кВтч					
																					1.48	0.84	6	0.074					

Дата: 28.06.07.

Условная внешняя скоростная характеристика без добавки водорода

п. об/мин	Re, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное	
1900	1123	262.8415	1093.577	80	95	3.4	40	29	75	479	486	56.68	1688.68	2							200.3949	1.98621501	1.999545	2493.92	2493.92	0.314065143
1700	1287	290.0282	1253.281	81	100	3	41	29	66	489	495	65.16	1467.18	2.5							190.1897	1.77324148	1.785142	2427.04	2427.04	0.330917271
1500	1206	239.7995	1174.403	79	97	2.7	39	30	50	470	487	44.46	1187.6	2.2							185.4049	1.76077673	1.792728	1956.24	1956.24	0.339457444
1300	1310	225.7483	1275.678	79	96	2.3	38	31	35	501	511	37.83	911.43	3							167.576	1.60618557	1.616965	1664.52	1664.52	0.375573144
1100	1271	185.331	1237.7	79	95	2	38	31	26	524	530	30.36	660.79	3.1							163.815	1.4510101	1.460748	1335.84	1335.84	0.384195869
900	1205	143.7604	1173.429	78	94	1.6	37	31	19	540	547	24.15	475.88	10							167.9878	1.3136784	1.322495	1062.6	1062.6	0.374652508

Условная внешняя скоростная характеристика с добавкой водорода 0.42 кг/ч

п. об/мин	Re, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное	
1900	1139	286.8713	1109.158	79	88	3	43	31	78	465	490	57.28	1692.18	1.6							199.6714	1.96948324	1.982701	2520.32	2520.32	0.315203142
1700	1283	289.1248	1249.385	80	95	2.9	42	32	68	483	508	54.3	1504.09	2							187.8082	1.84664211	1.859036	2389.2	2389.2	0.335113537
1500	1295	267.4962	1261.071	80	98	2.6	40	32	51	480	503	44.03	1188.04	2.2							170.9928	1.79883413	1.810907	1937.32	1937.32	0.368068427
1300	1309	225.5759	1274.704	79	97	2.3	39	32	39	495	532	36.87	900.14	3							163.4483	1.62759244	1.638516	1622.28	1622.28	0.385057941
1100	1277	186.2059	1243.543	79	96	2	38	33	28	516	554	29.82	658.3	5.5							160.1453	1.4717162	1.481597	1312.08	1312.08	0.382998552
900	1205	143.7604	1173.429	78	94	1.6	38	33	19	531	584	23.3	474.31	13							162.0752	1.35711016	1.366218	1025.2	1025.2	0.388320089

Испытательный цикл ESC с добавкой водорода 0.42 кг/ч

№	Режим	п. об/мин	Re, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное		
1	XX	600	0	0	0	72	85	1.3	35	30	5	223	230	1.55		0.4	106	197	101	0.84					68.2	188.2	0		
2	A-100	1180	1232	192.7092	1199.722	77	88	2.4	34	30	32	478	520	32	737.76	1.8	77	129	658	9.7			166.0533	1.537	1.502	1408	1648	0.372664991	
3	B-50	1450	631	121.285	614.4678	76	89	2.8	35	30	22	374	406	20.27	753.49	1	122	105	445	5.8			167.127	2.4775806	2.381198	891.88	1251.88	0.361971558	
4	B-75	1450	928	178.3716	903.6864	76	100	2.8	35	30	34	414	451	29.96	903.81	1.3	92	98	467	7.17			167.964	2.0111482	1.96144	1318.24	1798.24	0.361541272	
5	A-50	1180	610	95.41609	594.018	77	92	2.2	35	31	17	377	417	15.34	533.43	1.1	96	92	586	6.1			160.7695	2.31825293	2.195628	674.96	1274.96	0.359515019	
6	A-75	1180	918	143.5934	893.9484	77	91	2.2	34	31	23	424	470	23.16	619.81	2.1	67	105	604	8.11			161.2888	1.78413932	1.724238	1019.04	1739.04	0.364462555	
7	A-25	1180	330	51.61854	321.354	75	89	2.2	34	31	18	288	321	8.8	474.6	0.7	572	219	383	3.58			170.4814	3.59545455	3.261744	387.2	1227.2	0.303360873	
8	B-100	1450	1235	237.3803	1202.643	78	91	2.7	33	31	47	450	490	39.3	1068.09	1.7	64	91	508	8.19			165.5571	1.81175573	1.780184	1729.2	2689.2	0.360158275	
9	B-25	1450	327	62.85293	319.4326	76	90	2.7	35	31	21	300	338	11.92	619.51	0.6	700	289	311	3.78			189.6491	3.46482103	3.226732	524.48	1604.48	0.275193301	
10	C-100	1730	1159	265.7904	1128.634	78	92	3.2	36	31	64	436	467	48.4	1487.54	1.5	76	95	583	7.48			182.0984	2.04895317	2.022364	2129.6	3329.6	0.327184812	
11	C-25	1730	314	72.00879	305.7732	75	91	3.2	37	31	23	301	320	15.53	825.74	0.6	780	281	249	3.85			215.6681	3.54470917	3.359644	683.32	2003.32	0.24457753	
12	C-75	1730	874	200.4321	851.1012	76	92	3.2	36	31	47	396	426	37.12	1220.3	1.2	615	93	350	6.59			185.1999	2.19163075	2.150411	1633.28	3073.28	0.312298991	
13	C-50	1730	597	136.9084	581.3586	75	88	3.5	35	31	32	356	382	26.6	1016.1	1.1	148	87	348	5.55			194.2904	2.54661654	2.473918	1170.4	2730.4	0.285834614	
																					CO, г/кВт ч	CH, г/кВт ч	NOx, г/кВт ч	Pt, г/кВтч					
																					1.4	0.51	6.21	0.056					

Регулировочная характеристика по водороду

Gn, кг/ч	Режим	п. об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное
0	C-100	1730	960	220.1543	934.848	77	90	3.5	36	36	50	426	430	40.66		1.7						184.6887	1789.04	1789.04	0.34077379		
0.42	C-100	1730	971	222.6789	945.5598	79	96	3.2	39	39																	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

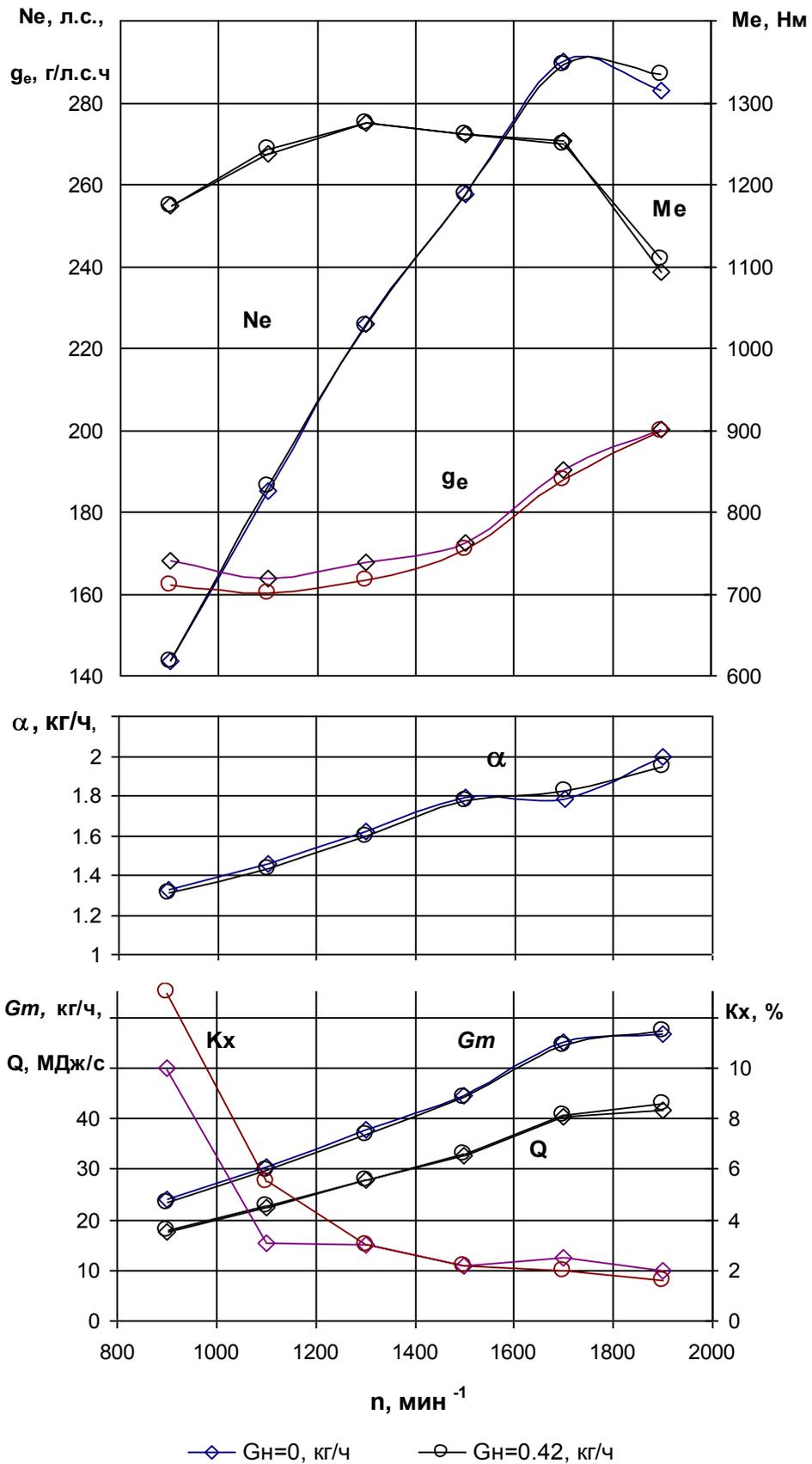


Рисунок В1 – Условная внешняя скоростная характеристика
(двигатель КАМАЗ 740.62 – 280)

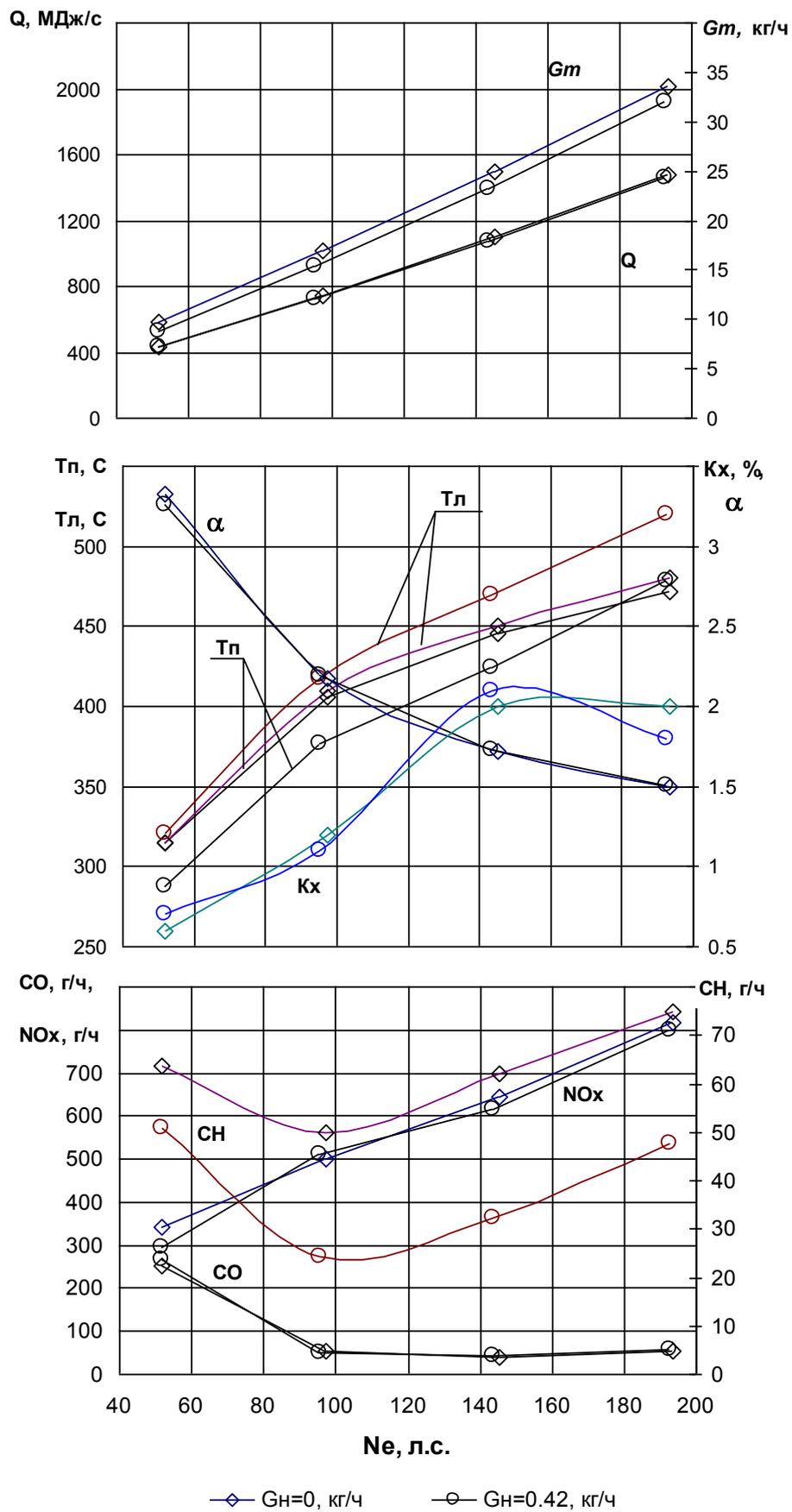


Рисунок В2 – Нагрузочная характеристика
 (двигатель КАМАЗ 740.62 – 280, $n = 1180 \text{ мин}^{-1}$)

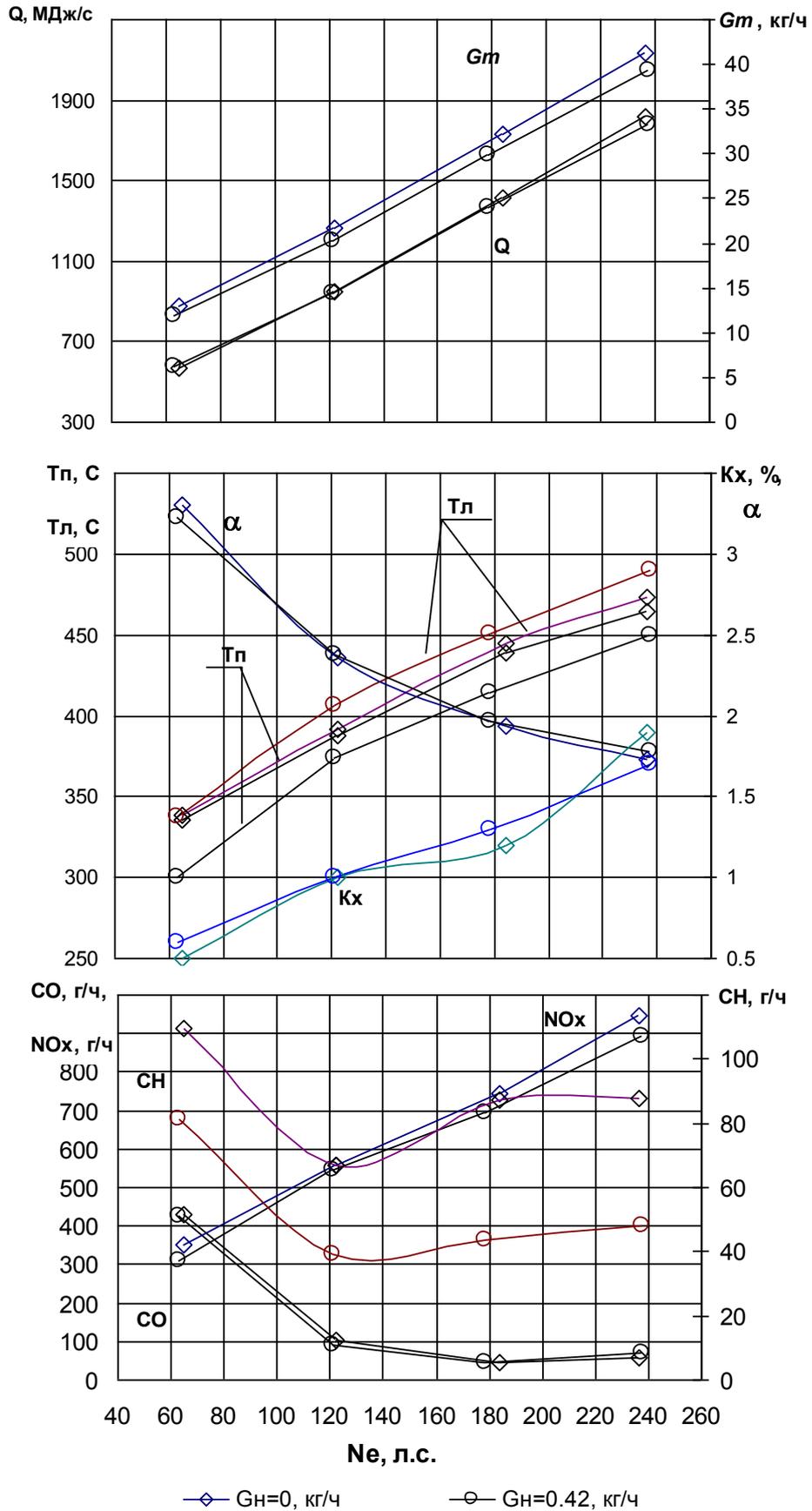


Рисунок В3 – Нагрузочная характеристика (двигатель КАМАЗ 740.62 – 280, $n = 1450 \text{ мин}^{-1}$)

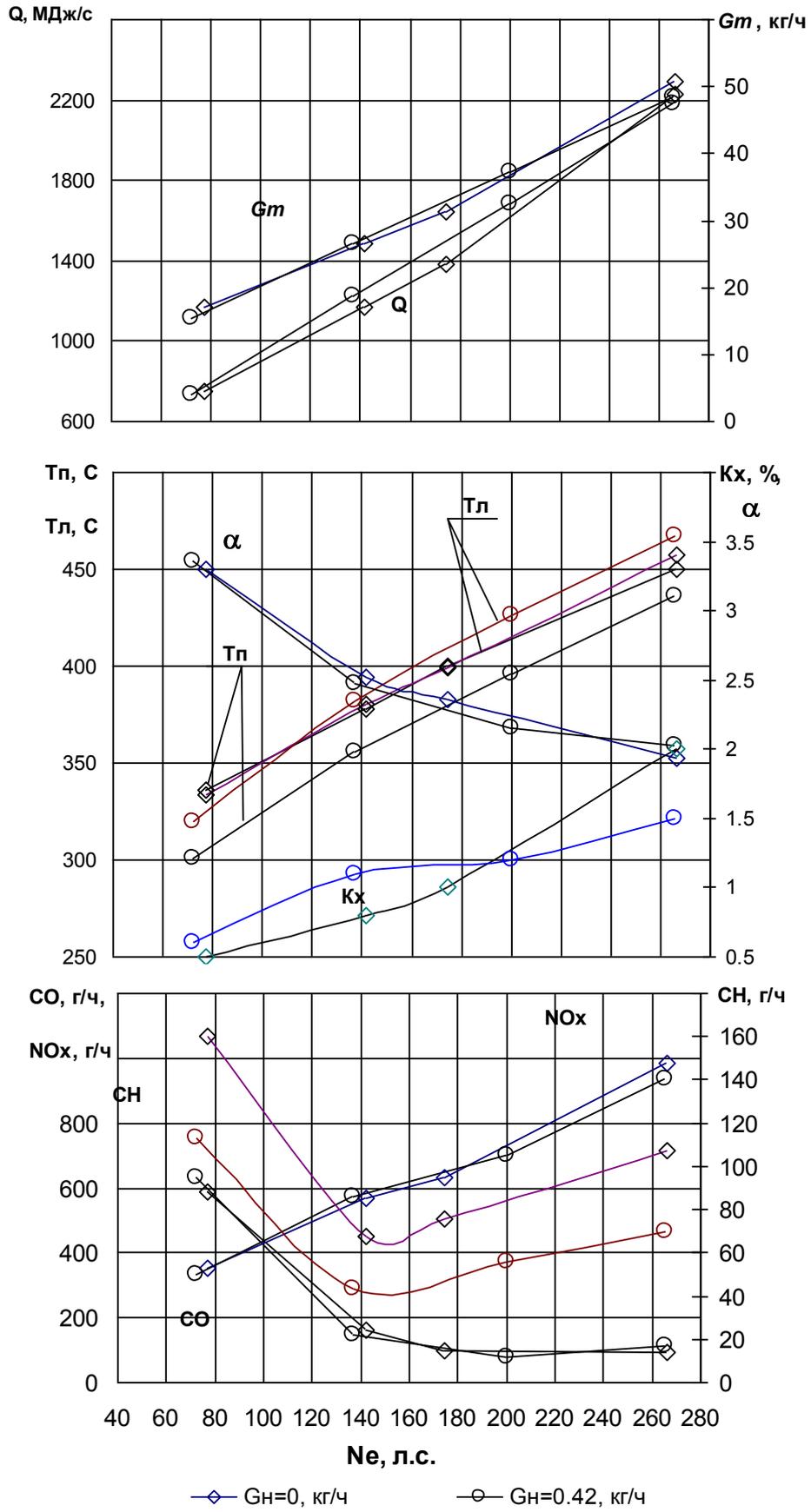


Рисунок В4 – Нагрузочная характеристика (двигатель КАМАЗ 740.62 – 280, $n = 1730 \text{ мин}^{-1}$)

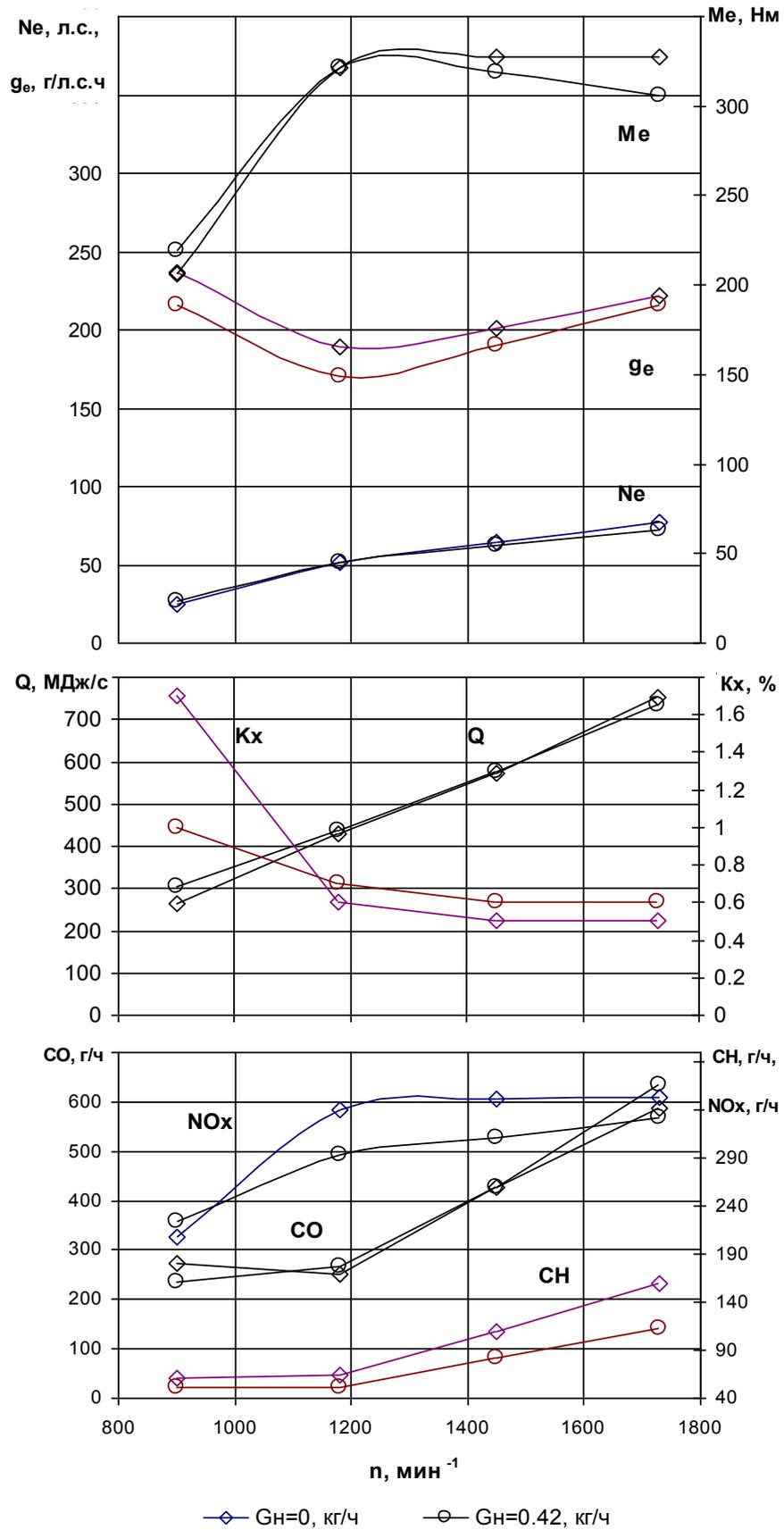


Рисунок В4 – Частичная скоростная характеристика (двигатель КАМАЗ 740.62 – 280, 25% открытия топливной рейки ТНВД)

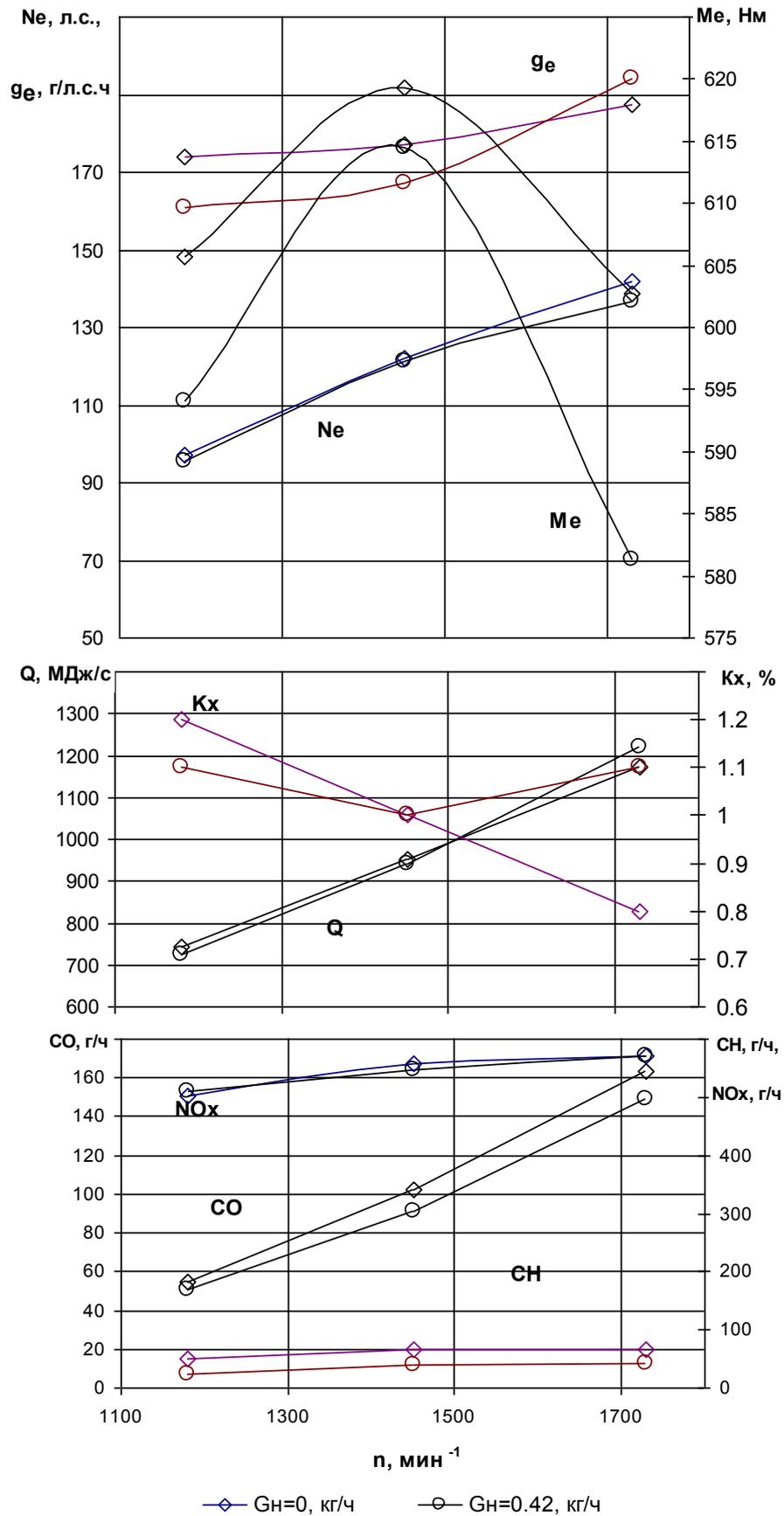


Рисунок В5 – Частичная скоростная характеристика.
 (двигатель КАМАЗ 740.62 – 280, 50% открытия топливной рейки ТНВД)

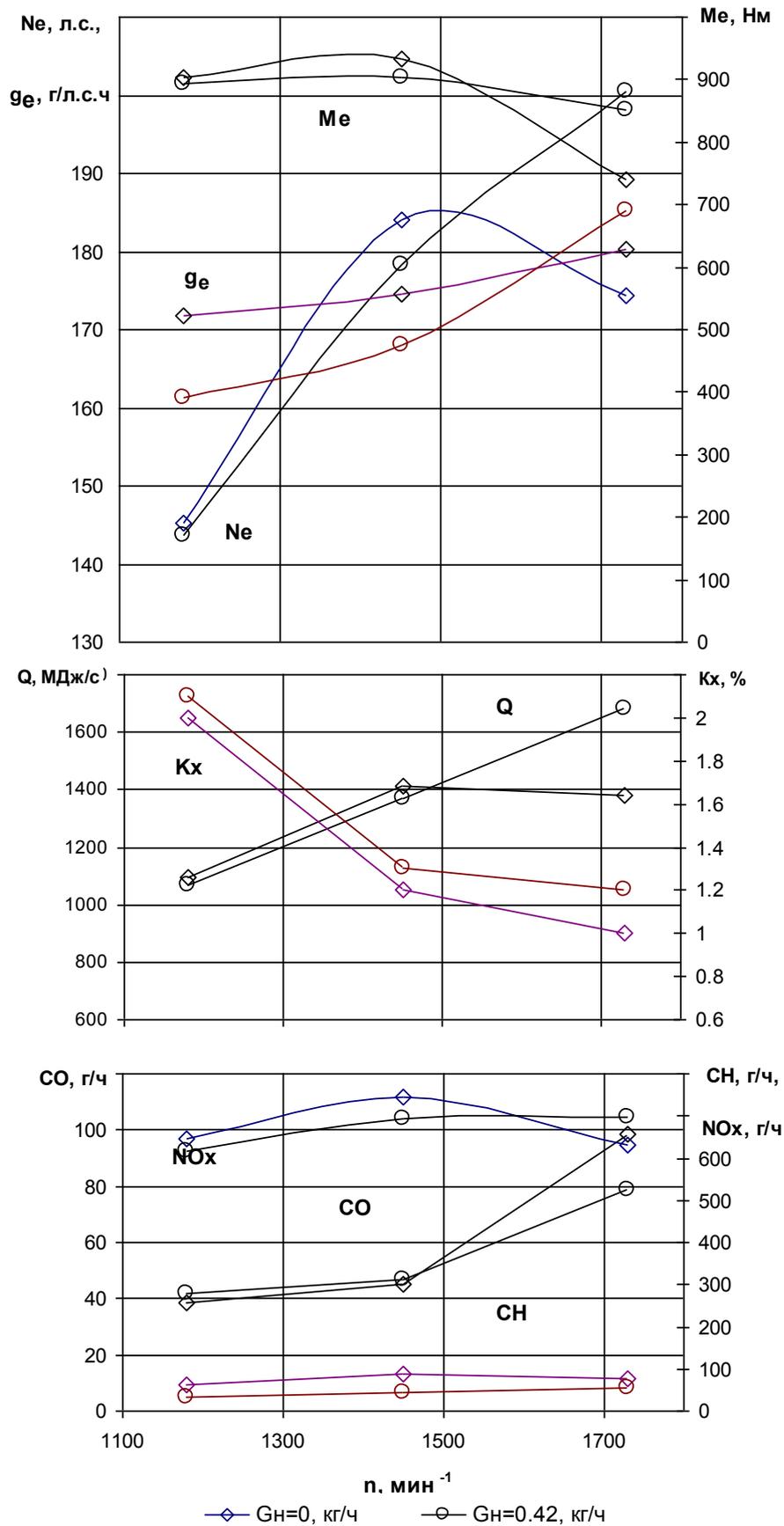


Рисунок В5 – Частичная скоростная характеристика (двигатель КАМАЗ 740.62 – 280, 75% открытия топливной рейки ТНВД)

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты исследований газового двигателя с добавками водорода.

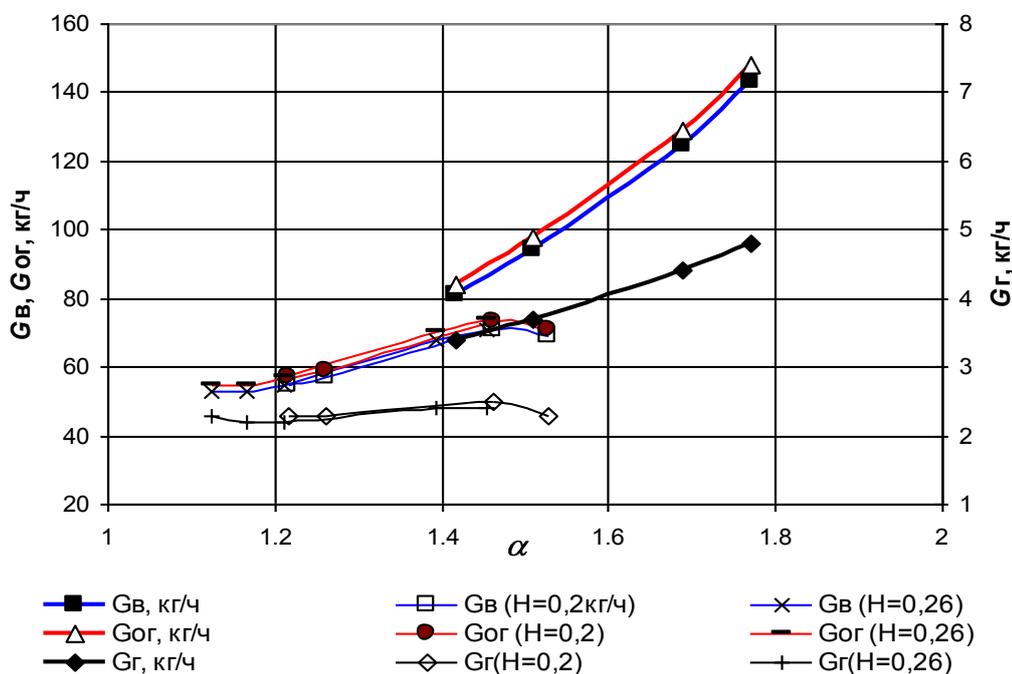


Рисунок Г1 - Регулировочная характеристика по коэффициенту избытка воздуха ($n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0$, $УОЗ = 0$)

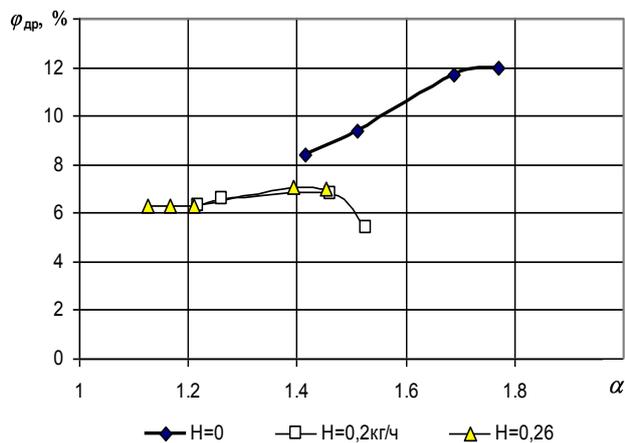


Рисунок Г2 – График зависимости положения дроссельной заслонки ($n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0$)

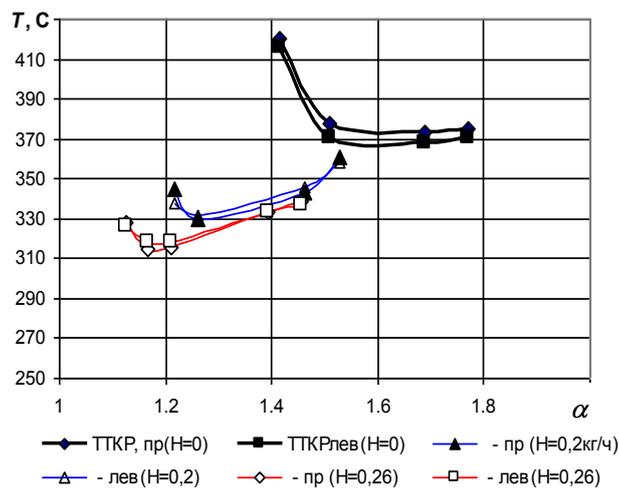


Рисунок Г3 – График изменение температуры перед турбиной в левом и правом рядах двигателя ($n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0$)

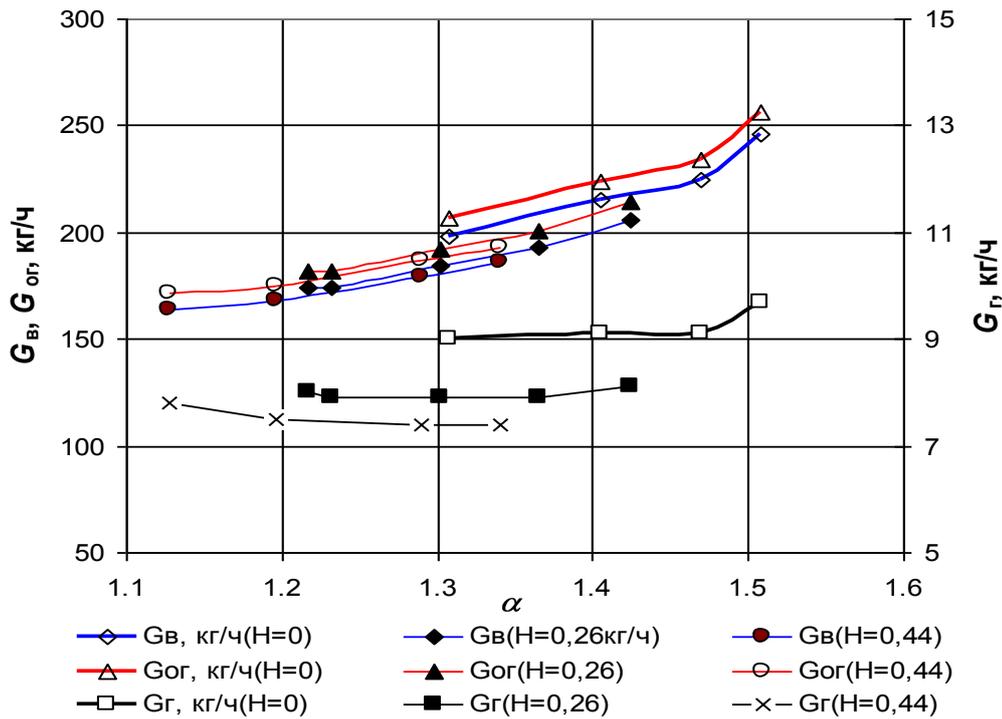


Рисунок Г4 – Регулировочная характеристика по коэффициенту избытка воздуха ($n = 1500 \text{ мин}^{-1}, P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2, \text{УОЗ} = 15 \text{ гр.п.к.в.}$)

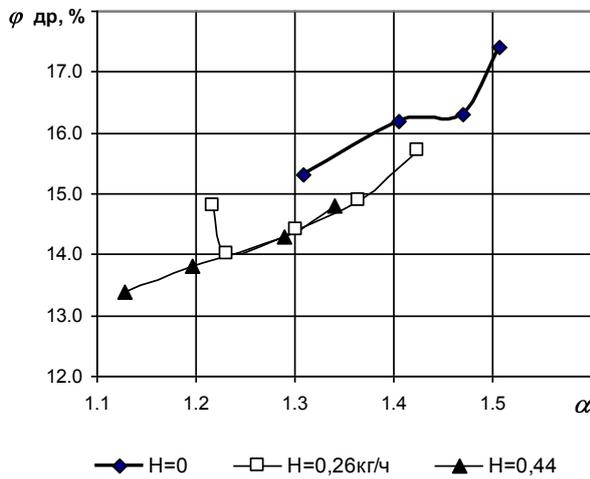


Рисунок Г5 – График зависимости положения дроссельной заслонки при добавках водорода ($n = 1500 \text{ мин}^{-1}, P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2, \text{УОЗ} = 15 \text{ гр.п.к.в.}$)

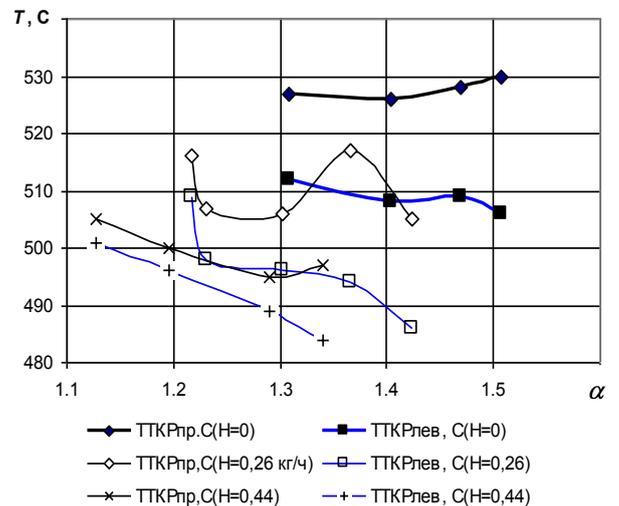


Рисунок Г6 - График изменения температуры газа перед турбиной при добавках водорода ($n = 1500 \text{ мин}^{-1}, P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2, \text{УОЗ} = 15 \text{ гр.п.к.в.}$)

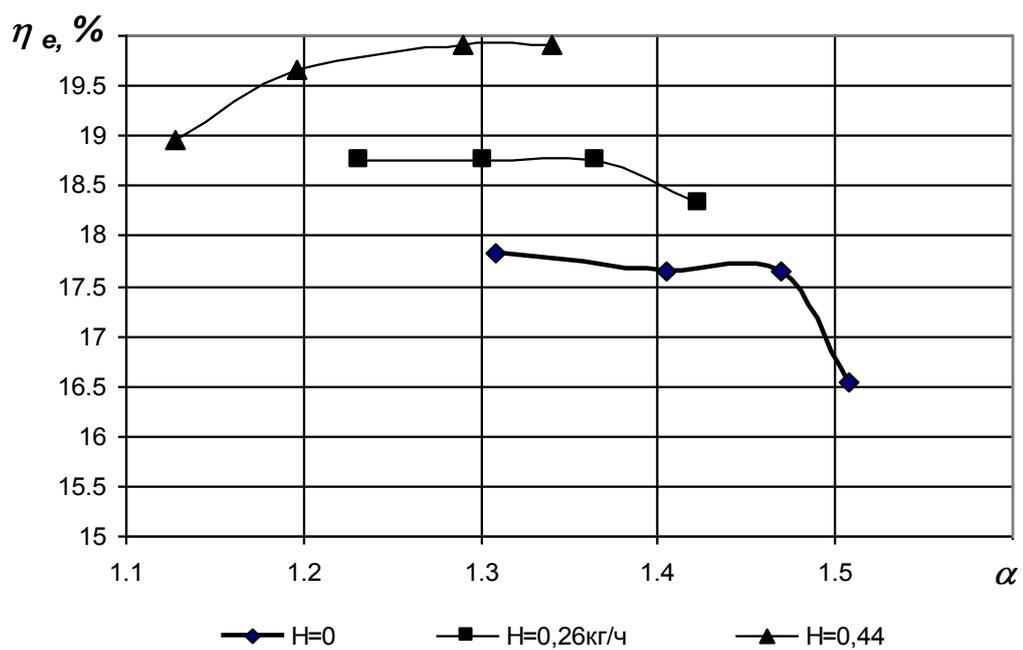


Рисунок Г8 – График изменения эффективного КПД при добавках водорода ($n = 1500\text{мин}^{-1}$, $P_e = 1,46 \text{ кг/см}^2$, УОЗ = 15 гр.п.к.в.).

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Техническое описание системы подачи «гремучего» газа

1 Назначение системы

Система предназначена для подачи «гремучего» газа и его компонентов в дизельный двигатель.

2 Технические данные

Максимальное допустимое давление в системе: 0,2 МПа

Максимально допустимый расход «гремучего» газа: не более 1,5 нм³/ч

3 Состав системы подачи «гремучего» газа и его компонентов

Система состоит из:

- газогенератор (электролизера) на базе комплекса МБВ-1 ЮШГИ.002 (Эл-р);
- преобразователя напряжения;
- регулятора напряжения (в случае необходимости его использования);
- газовой горелки;
- влагоотделителя;
- пневмокранов (ПК);
- водородной магистрали (H₂);
- кислородной магистрали (O₂).

4 Принцип работы системы

Принципиальная схема системы представлена на рисунке Д1. Система работает следующим образом:

Перед началом работ необходимо закрыть пневмокраны ПК2, ПК4, ПК5 и открыть ПК1 и ПК3. Далее подается напряжение на газогенератор (Эл-р) и производится его прогрев до рабочей температуры и производительности в соответствии с инструкцией по эксплуатации комплекса МБВ-1ЮШГИ.002. При этом образующийся газ сжигается в горелке. Одновременно с прогревом газогенератора допускается осуществлять прогрев двигателя и вывод его на исследуемый режим работы.

По окончании прогрева Эл-ра и ДВС откивается пневмокран ПК2, и закрывается ПК1. В систему впуска ДВС начинает подаваться кислород. После установления стационарного режима работы двигателя открывается ПК 4 (или ПК5) и затем производится закрытие ПК3. В систему впуска ДВС начинает подаваться водород.

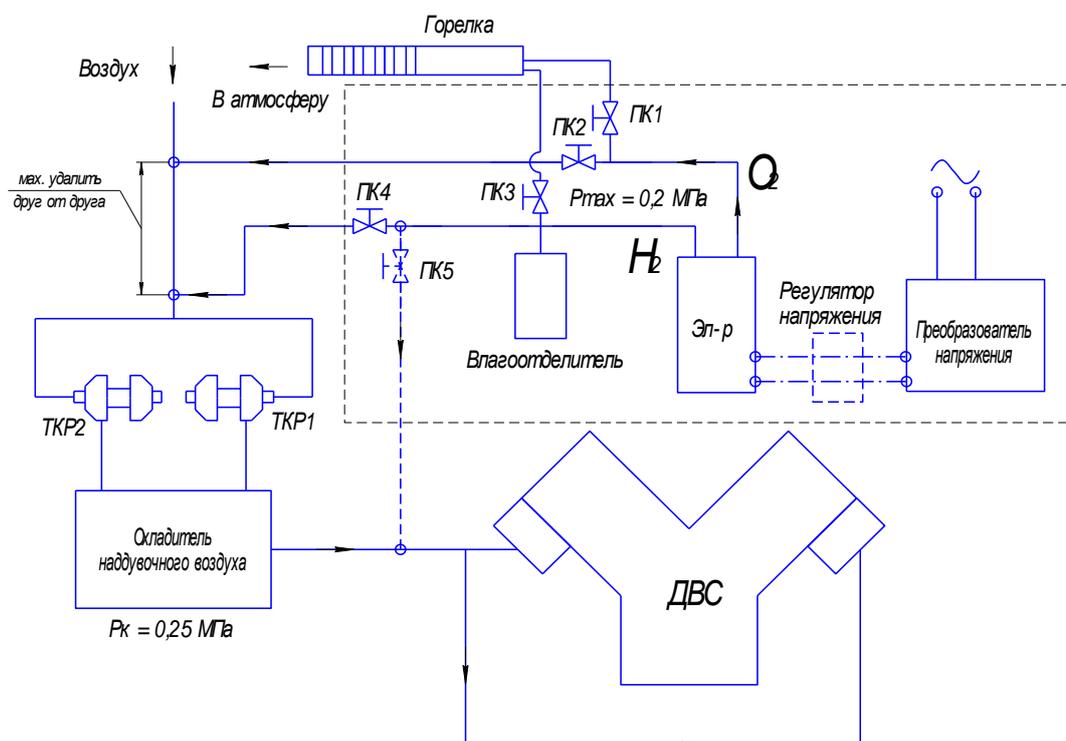


Рисунок Д1 – Схема подачи «гремучего» газа и его компонентов в ДВС

Регулирование количества подаваемого «гремучего» газа осуществляется путем изменения входного напряжения в газогенератор в диапазоне, допускаемом эксплуатационными характеристиками устройства. Количественно расход «гремучего» газа определяется по показаниям амперметра установленного в силовую электросеть газогенератора, в соответствии с вольтамперной характеристикой электролизера.

Выключение системы осуществляется следующим образом. Открываются ПК1 и ПК3. Далее осуществляется закрытия ПК4 (или ПК5) и ПК2. При этом образующийся в газогенераторе газ сжигается в горелке. Выключение газогенератора осуществляется в соответствии с инструкцией по

эксплуатации комплекса МБВ-1ЮШГИ.002

3 Горелка располагается на открытом воздухе и необходимом удалении от помещений и др. сооружений.

4 Горелка должна обеспечивать сжигание как водорода в атмосферных условиях, так и гремучего газа.

5 Система должна гарантированно обеспечивать герметичность магистралей и кранов при давлении 0,3 МПа.

6 Запрещается подача гремучего газа и его компонентов на впуск при неработающем двигателе.

7 Останов двигателя осуществлять по истечении 3-5 минут после отключения системы подачи гремучего газа и его компонентов.

8 На режимах низкого наддува (до $P_k = 0,15$ МПа) допускается подача водорода через ПК5 непосредственно во впускной коллектор двигателя. На всех других режимах работы двигателя подача водорода через ПК5 недопустима.