

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

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Поршневые и комбинированные двигатели

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Повышение экономичности и экологичности стационарных
гибридных установок

Студент

С.А. Пионтковская

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.т.н., проф. А.П. Шайкин

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

(личная подпись)

«___» июня 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

«___» июня 2017 г.

Тольятти 2017

Содержание

Введение.....	4
1 Выбор базовых характеристик силовой установки.....	6
1.1 Общие сведения и основные требования к силовой установке	9
1.2 Основные свойства и характеристики природного газа как топлива.	10
1.3 Анализ способов конвертации двигателей	14
1.4 Техническая характеристика и требования предъявляемые к газопоршневой силовой установке	16
1.4.1 Назначение образца	16
1.4.2 Состав образца.....	17
1.4.3 Технические требования к образцу.....	17
2 Проблемы построения и совершенствования системы энергообеспечения.....	22
2.1 Схема силовой установки ГГПСУ	23
2.2 Типы накопителей энергии гибридных установок	24
2.2.1 Свинцово-кислотные аккумуляторы.....	26
2.2.2 Никель-кадмиевые аккумуляторы.....	29
2.2.3 Никель-железные аккумуляторы.....	29
2.2.4 Аккумуляторы типа «Цинк-бром»	30
2.2.5 Литиевые аккумуляторы	31
2.2.6 Никель – металл – гидридные аккумуляторы.....	31
2.2.7 Оценка электрохимических систем по отношению к параметрам традиционного свинцово-кислотного аккумулятора	32
2.3 Электростатические системы накопления энергии	33
3 Результаты испытаний системы ГСГ-ДВС	35
3.1 Объект испытаний	35
3.2 Методика проведения испытаний.....	35
3.3 Результаты испытаний	42

3.3.1 Результаты испытаний при работе двигателя на холостом ходу и их анализ.....	44
3.3.2 Результаты испытаний при работе двигателя на режиме, характеризуемом частотой вращения $n=2185 \text{ мин}^{-1}$ и их анализ.....	48
3.3.3 Результаты испытаний при работе двигателя на режиме, характеризуемом частотой вращения $n = 3277 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузкой $P_e = 0,33 \text{ МПа}$ и их анализ.....	51
3.4 Общая характеристика выполненной работы и полученных результатов.	53
3.5 Описание работы генератора синтез газа	56
3.5.1 Назначение и условия эксплуатации генератора синтез-газа	56
3.5.2 Состав и назначение узлов, входящих в генератор синтез-газа	56
3.5.3 Работа генератора синтез-газа на бензине	59
3.5.4 Химический анализ состава синтез-газа.....	64
3.5.5 Характерные неисправности генератора синтез-газа и методы их устранения.....	65
3.5.6 Особые условия эксплуатации генератора синтез-газа	65
4 Схема силовой установки ГГПСУ	67
Заключение	69
Список использованных источников.....	70
Приложение А	74
Приложение Б.....	78
Приложение В.....	81

Введение

Одним из приоритетных направлений развития энергетики в целом как отрасль является развитие малой энергетики. Это связано, прежде всего, с необходимостью обеспечения 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, прежде всего, это экономическая доступность (низкая цена), дешевая и простая эксплуатация энергетической установки, а также ее экологичность. Таким образом, становятся актуальными задачи разработки высокоэффективных энергетических установок выполняющих перспективные требования по экономическим и экологическим показателям.

Целью магистерской работы является повышение эффективности стационарных гибридных установок.

Для достижения поставленной цели, необходимо выполнить следующие задачи исследования:

- провести анализ существующих гибридных систем, используемых для энергообеспечения объектов;
- провести анализ перспективных направлений развития гибридных систем;
- разработать рекомендации на основе проведенного анализа по повышению экономических и экологических показателей стационарных гибридных установок.

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

Предметом исследования являются стационарная гибридная установка.

Научная новизна исследования состоит в обосновании методов, обеспечивающих повышение экологических и экономических показателей гибридных установок.

Практическая значимость работы заключается в конкретном техническом предложении, обеспечивающим улучшенные показатели гибридной установки. На защиту выносятся:

- направления повышения эффективных и экологических показателей гибридных установок;
- рекомендации по совершенствованию стационарных гибридных установок.

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

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения включающего основные результаты и выводы, списка литературы. Работа изложена на 73 страницах машинописного текста, включает 3 приложения, иллюстрированного 16 таблицами и 23 рисунками, общий объем составляет 90 страниц.

1 Выбор базовых характеристик силовой установки

Принятая в России Концепция перехода на инновационный путь развития экономики предусматривает переход страны от экспортно-сырьевого к ресурсно-инновационному развитию с качественным обновлением энергетики (как топливной, так и нетопливной) и смежных отраслей [1].

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 [1], 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].

В интересах развития российской энергетики, распространяемых в том числе и на объекты малой энергетики, следует развивать направление исследований в области генерации тепловой и электрической энергии для автономных децентрализованных потребителей. Как показывает практика, проблема децентрализованных потребителей заключается в удаленности от транспортных схем, что кратно увеличивает стоимость доставки топливных ресурсов. Зачастую в таких удаленных районах имеются запасы местных низкосортных топлив, которые можно использовать в качестве энергоносителя,

но характеристики этих топлив настолько осложняют организацию процесса прямого сжигания в топках котлов, что на практике используются в редких случаях.

Меморандум о создании и деятельности технологической платформы «Малая распределенная энергетика» гласит, что одними из основных сфер применения новых технологических решений малой распределенной энергетики являются [2]:

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

Одними из основных направлений технологического развития, поддерживаемыми в рамках технологической платформы, являются:

- технологии генерации электрической и тепловой энергии, включая топливные элементы, водородную энергетику;
- технологии использования местных энергетических ресурсов, в том числе современные технологии использования торфа как топливного ресурса, газификация местных топливных ресурсов, отходов производства и бытовых отходов с использованием синтез-газа для генерации энергии.

Таким образом, работы по темам, связанным с исследованиями в области энергоснабжения удаленных потребителей на базе когенерационных установок, генерирующих синтез-газ на основе местных топлив с использованием топливных элементов, представляются актуальными.

Малая энергетика как неотъемлемый элемент энергетического пространства признается как в России, так и во всем мире. Более того, целесообразность искусственного развития малой распределенной энергетики считается позитивным, экономически и социально перспективным фактом. В силу географических и экономических факторов в России естественным

образом сложилась ситуация, когда огромные территории не охвачены централизованным энергоснабжением и существуют проблемы с обеспечением таких территорий топливными ресурсами.

В настоящее время выработка электроэнергии в децентрализованных районах в основном производится посредством дизельных электростанций, что признается экономически неэффективным. При этом отмечается, что такие районы зачастую обладают запасами местных низкосортных топлив, но для их потребления требуются соответствующие технические устройства.

Вывод: сегодня остро стоит вопрос об энергоснабжении децентрализованных потребителей как в коммунальном хозяйстве, так и в производстве. Использование когенерационных систем на основе двигателей внутреннего сгорания, сжигающих привозное дизельное топливо, является пережитком прошлого и требует замещения путем внедрения новых технологий комбинированной выработки тепловой и электрической энергии из местных низкосортных топливных ресурсов.

Перспективные технологии для автономного децентрализованного энергоснабжения

Существующие исследования в области автономного тепло- и электроснабжения можно разделить по следующим основным направлениям:

- а) совместное сжигание нескольких видов твердых топлив (уголь, биомасса);
- б) производство синтезированных газов;
- в) производство и последующее сжигание топливных брикетов;
- г) производство водорода и использование в топливном элементе;
- д) создание гибридных установок.

К современным силовым установкам предъявляются высокие требования по таким характеристикам как экономичность, экологичность, мощностные параметры, а также экономическая доступность. Выполнение всех перечисленных характеристик одновременно невозможно по причине взаимоисключающих свойств этих характеристик. Тем не менее, по-видимому,

можно найти решение задачи, обеспечивающее максимально возможное приближение к перечисленным требованиям.

1.1 Общие сведения и основные требования к силовой установке

По мнению большинства специалистов наиболее перспективным топливом на ближайшие 20-50 лет является природный газ. Это связано, прежде всего, с относительно большими его запасами, а также высокими характеристиками как топлива одновременно обеспечивающие высокую

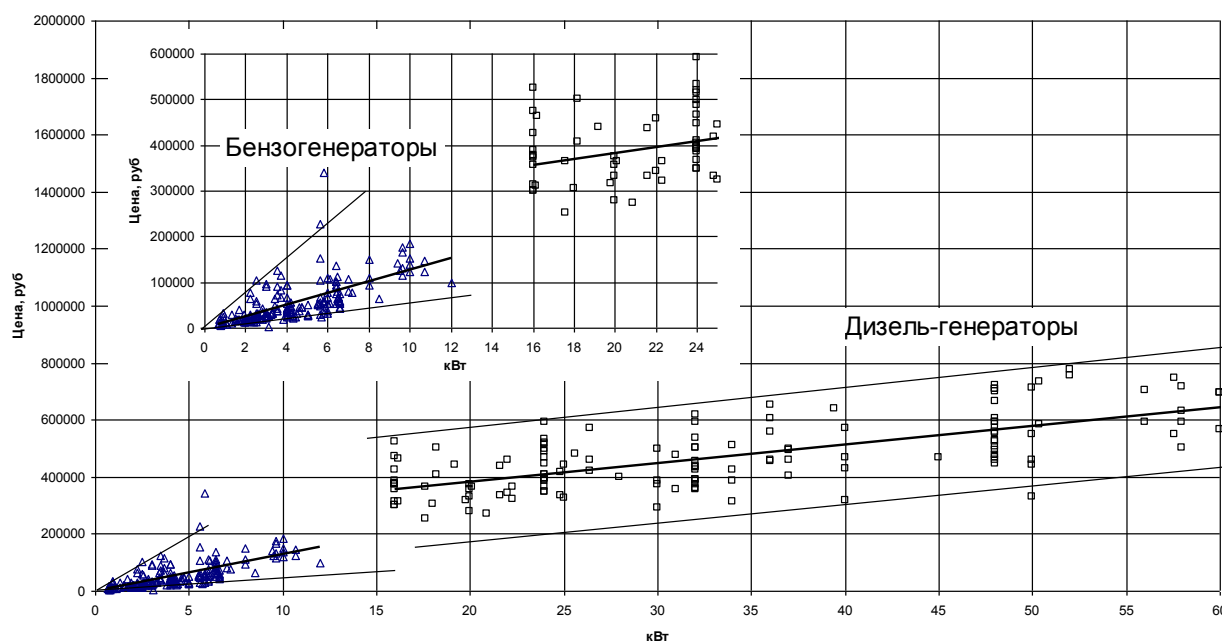


Рисунок 1.1 - Изменение цены генератора в зависимости от его мощности

калорийность и экологичность сгорания. Кроме этого, по последним данным около 30 % населенной территории России имеет развитую сеть газотрубопроводов, что определяет его дешевизну и доступность этого вида топлива по отношению к другим видам топлива.

Анализ применяемых сегодня силовых установок использующихся в автономных электростанциях показывает, что газовое топливо (природный газ) используется в основном в энергетических установках (ЭУ) мощностью более 500 кВт. ЭУ меньшей мощности используют в основном жидкие сорта топлив,

к ним относятся дизель-генераторы и бензогенераторы. Газопоршневые генераторы мощностью менее 500 кВт отсутствуют.

На рисунке 1.1 представлено изменение цены генераторов в зависимости от его мощности. Из рисунка можно сделать несколько выводов:

- ЭУ мощностью порядка 12-20 кВт практически отсутствуют;
- цена с увеличением мощности генератора существенно растет, причем интенсивность роста зависит от типа генератора.

1.2 Основные свойства и характеристики природного газа как топлива.

Природный газ является привлекательными альтернативными топливами для двигателей внутреннего сгорания [2,11]. Природный газ (GN), обеспечивает более чистое сгорание, является широко распространенным и более дешевым, чем бензин или дизельное топливо. Его ресурсы во всем мире являются относительно большими. Даже значительное увеличение спроса только в небольшой степени уменьшит эти ресурсы [13]. Поэтому не предвидится, что увеличение его потребления, приведет к значительному росту его цены.

Применение GN, обеспечит низкую эмиссию реактивных углеводородов, CO и твердых частиц [2, 14]. Основным компонентом GN является метан (85...95%). К остальным компонентам следует отнести сложные углеводороды, азот и воду.

Из-за того, что молекулы метана окисляются без промежуточных продуктов, эффективное сгорание и низкий уровень эмиссии токсических компонентов возможны в случае сгорания при достаточном количестве воздуха. В идеальных условиях сгорания отработавшие газы содержат только четыре компонента: водяной пар, CO₂, азот и избыточный кислород. В реальном процессе сгорания отработавшие газы содержат несгоревшее или частично окисленное топливо, окись углерода (CO), окись серы, окись азота (NO), двуокись азота (NO₂), которые обычно представляются как NO_x, а также

твердые частицы РМ, образующиеся вследствие попадания в камеру сгорания смазочного масла.

Главной составляющей, загрязняющей окружающую среду в процессе сгорания GN, является не сгоревший метан, причиной появления которого являются неправильные пропорции составляющих топливовоздушной смеси, а также неполное перемешивание реагентов. Так как образующиеся при сгорании метана отработавшие газы химически менее активны, чем газы, содержащие тяжелые углеводороды, возникающие в процессе сгорания бензина и дизельного топлива, они незначительно загрязняют воздух [2, 12, 13].

Проблемой, как в процессе сгорания метана, так и в случае сгорания бензина или дизельного топлива является эмиссия NOx. Избыток воздуха, образующийся при сгоранию обедненной смеси, приводит к снижению эмиссии NOx [2,14,15]. В процессе сгорания обедненных смесей снижается эффективность окислительных нейтрализаторов из-за низкой температуры отработавших газов, излишка окисляющего вещества (O_2) и отсутствия восстанавливающих NO компонентов - CO и H_2 в отработавших газах, которые являются необходимыми для восстановления молекулы NOx. В двигателях, питаемых GN, со сгоранием стехиометрических смесей для контроля за содержанием NOx применяется трехкомпонентный нейтрализатор с обратной связью и рециркуляция продуктов сгорания. Эмиссия NOx возникает в результате окисления азота воздуха с участием химически активных частиц. Чем выше температура сгорания, тем выше уровень эмиссии NOx. Так как двигатели, питаемые GN, характеризуются высокой степенью сжатия, проблема снижения эмиссии NOx решается часто путем снижения температуры сгорания, в результате добавления газообразного продукта, имеющего высокую теплоемкость. Достигается это с помощью EGR (рециркуляции продуктов сгорания). Возможно это, однако, только на частичных режимах, так как на режимах полной нагрузки рециркуляция продуктов сгорания снижает мощность двигателя. Выброс NOx в отличие от несгоревшего метана является непосредственной причиной загрязнения воздуха, поэтому следует

предпринять меры с целью уменьшения его количества. Существует прямая связь между эмиссией NOx и углеводородов (HC) в двигателях с искровым зажиганием. Минимальная эмиссия HC имеет место тогда, когда коэффициент избытка воздуха близок к стехиометрическому показателю. В этих условиях температура сгорания близка к своему максимальному значению и поэтому эмиссия NOx достигает максимума [14, 15].

Молекула метана содержит один атом углерода и четыре атома водорода, что является низким соотношением по сравнению с другими топливами. В результате этого GN называют топливом «обедненным углеродом», что является причиной возникновения в малом количестве CO и CO₂. У двигателей, питаемых стехиометрической смесью - эмиссия CO из двигателей, заправляемых GN, является более высокой, чем у работающих на бедной смеси, но ниже чем в случае применения бензина или дизельного топлива. Небольшое количество серы в GN (приблизительно 8-30 ppm) содержится, в основном, в пахучих веществах, добавляемых с целью определения неплотностей. Сера, окисленная в процессе сгорания, и ее окись является одним из продуктов сгорания.

«Конвертированные двигатели, питаемые GN, характеризуются более высоким коэффициентом полезного действия, чем двигатели, работающие на бензине, а к.п.д. двигателей, приспособленных к сгоранию бедной смеси, близок к к.п.д. дизельного двигателя. Октановое число метана, являющегося основным компонентом GN, определенное по исследовательскому методу (LOB), равно 130, поэтому он обладает превосходными антидетонационными свойствами, благодаря чему можно значительно увеличить степень сжатия двигателя» [2, 16].

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

воспламенения, что является необходимым в случае применения жидких топлив, поэтому отсутствует проблема холодного запуска. Возможность применения при низких температурах является большим преимуществом GN по сравнению, например, со спиртовыми топливами.

«Природный газ легче, чем воздух, он быстро рассеивается в атмосфере. Температура вспышки GN равна 648 °С, что значительно выше, чем температура вспышки бензина. Она характеризуется также узким пределом воспламенимости, что препятствует случайному возгоранию» [11, 2].

GN является смесью нескольких газов, указанных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Компоненты природного газа

Компонент	Объемная доля [%]	Массовая концентрация [%]
Метан	92.29	84.37
Этан	3.60	6.23
Пропан	0.80	2.06
Бутан	0.29	0.99
Пентан	0.13	0.53
Гексан	0.08	0.39
CO ₂	1.00	2.52
Водород	1.80	2.89
Вода	0.01	0.01
Всего	100.00	100.00

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

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

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

1 Конвертация существующих двигателей, проводимая путем изменения или вставки новых элементов, создающая возможность использования в качестве топлива CNG.

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

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

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

1.3 Анализ способов конвертации двигателей

До настоящего времени использование газовых двигателей невелик. При малых масштабах производства экономически оправдано не создание оригинальных конструкций, а конвертация жидкотопливных двигателей обеспечением их максимальной унификации с базовыми жидкотопливными двигателями.

В случае бензиновых двигателей наиболее часто применяется концепция битопливного двигателя. Хотя эта концепция имеет ряд бесспорных преимуществ, при ее принятии не используются полной мере преимущества высокого октанового числа природного газа.

В случае внешнего смесеобразования применение битопливной концепции связано с неизбежным снижением мощности. В таблице 1.1 приведены некоторые результаты компьютерного моделирования параметров циклов стехиометрических бензиновых и газовых двигателей. Моделирование выполнено для случая центральной и распределенной подачи бензина. В последнем случае не учитывалось влияние на показатели цикла испарения топ-

лива в цилиндре. Учтено, однако, что в случае центрального впрыска подогрев свежего заряда меньше, так как часть подводимой теплоты затрачивается на испарение бензина.

Таблица 1.2 – Параметры рабочего цикла двигателя

Параметры цикла	Применяемое топливо и способ его подачи					
	Бензин, центральная подача	Бензин, распределенный впрыск	Газ, центральная подача	Бензин, центральная подача	Бензин, распределенный впрыск	Газ, центральная подача
$n, \text{мин}^{-1}$	4500	4500	4500	5600	5600	5600
α	1	1	1	1	1	1
$P_s, \text{МПа}$	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097
$T_s, \text{К}$	295	310	310	290	305	305
$Q_b, \text{Дж}$	1377	1316	1190	1370	1314	1196
$Q_w, \text{Дж}$	156	153	149	147	144	145
$P_{i,}, \text{МПа}$	1,212	1,151	1,036	1,233	1,175	1,063
η_i	0,373	0,371	0,369	0,372	0,369	0,367
$T_{\text{рез}}, \text{К}$	1373	1383	1383	1407	1418	1439
$T_{\text{ср.масс}}, \text{К}$	1312	1319	1285	1357	1364	1321
$T_{\text{т.ср}}, \text{К}$	1124	1137	1122	1152	1166	1143
$\alpha_{\text{т.ср}}, \text{Вт/м}^2 \text{ К}$	474	464	451	551	540	535
$T_{\text{рез}} \alpha_{\text{т.ср}}, \text{Вт/м}^2$	650802	641712	623733	775257	765720	762670
η_v^*	0,886	0,847	0,844	0,881	0,845	0,849
* - коэффициент наполнения определяется по смеси при условиях окружающей среды						

Как видно из таблицы 1.2, к.п.д. цикла бензинового и газового двигателя близки между собой, особенно в случае одинаковой температуры поступающей в цилиндры свежей смеси, несмотря на заметные отличия в составе рабочего тела. Снижение к.п.д. в газовой версии не более 1%. Снижение среднего давления цикла много больше, особенно если сравнивать с центральной подачей бензина. В этом случае снижение $P_{\text{ц}}$ составляет 13,78-14,52%. Если сравнивать с бензиновым двигателем, имеющим распределенную подачу топлива, снижение $P_{\text{ц}}$ составит 9,53-9,9%. Снижение среднего эффективного давления неизбежно выше вследствие уменьшения механического к.п.д.

Снижение мощности газового двигателя связано с:

1. Уменьшением подачи в цилиндры воздуха вследствие заметно большего парциального объема природного газа по сравнению с парциальным объемом бензина, даже если в последнем случае предположить полное испарение бензина до поступления в цилиндр. Согласно компьютерному моделированию поступление воздуха в цилиндр газового двигателя на номинальном режиме меньше на 11,2% по сравнению с поступлением воздуха в цилиндры двигателя с центральной подачей бензина.

2. Несколько меньшим значением теплотворной способности газозоудшной смеси (примерно на 2% при содержании метана около 99%).

3. Несколько меньшими к.п.д. цикла вследствие большего содержания в продуктах сгорания водяного пара, обладающего высокой теплоемкостью.

4. Снижением механического к.п.д., в основном, вследствие меньшего значения среднего давления цикла.

Для того, чтобы избежать снижения мощности в случае газовой модификации можно использовать наддув в сочетании с реализацией концепции «двигателя, работающего на бедных смесях». Эти решения могут оказаться экономически оправданными только в случае резкого повышения спроса на газовые двигатели.

Существенному снижению концентрации вредных выбросов с ОГ в газозоудшном двигателе способствует возможность использования нейтрализаторов, не опасаясь за их надежную работу, так как в случае, если приняты меры, предотвращающие попадание масла в камеру сгорания, в выпускных газах газозоудшного двигателя удельное содержание твердых частиц $< 0,05$ г/кВт.ч. Для удовлетворения нормам по выбросам необходимо использовать окислительный нейтрализатор.

1.4 Техническая характеристика и требования предъявляемые к газопоршневой силовой установке

1.4.1 Назначение образца

Газопоршневая силовая установка (ГПСУ) предназначена для использования в автономных миниэлектростанциях применяющихся в небольших жилых и производственных помещениях, а также в качестве резервного источника при выходе из строя стационарной сети электропитания.

1.4.2 Состав образца

ГПСУ для миниэлектростанции, включает:

- силовую раму для монтажа элементов конструкции;
- силовую газопоршневую установку на базе поршневого двигателя внутреннего сгорания;
- муфту, соединяющую газопоршневую установку и генератор;
- систему подачи и питания топливом силовой установки;
- резервную систему питания топливом;
- электронную систему управления силовой установкой (ЭСУ)
- систему автоматического поддержания частоты вращения при принятии/снятии нагрузки;
- автономную систему энергоснабжения МиниЭС с базовым напряжением 12В;
- систему контроля работы и диагностики МиниЭС;
- систему дистанционного управления МиниЭС;
- систему пуска и останова МиниЭС, в том числе и экстренные.

Примечание:

При необходимости:

- для обеспечения требований по шуму может быть предусмотрена возможность размещения ГПСУ в шумоизолирующем кожухе.
- для обеспечения требований по токсичности отработавших газов (ОГ) может быть предусмотрена возможность оснащения ГПСУ системой нейтрализации ОГ.

1.4.3 Технические требования к образцу

Требования по назначению:

1. Номинальная мощность ГПСУ при нормальных условиях 20 ± 2 кВт
2. Используемое топливо – природный газ ГОСТ 5542.
3. Время выхода на рабочий режим работы не более $10 \pm 0,5$ мин.
4. Время непрерывной работы 500 ± 50 часов;
5. Время работы ГПСУ на резервной системе питания топливом не менее 5 часов.
6. Система должна обеспечить стабильный пуск, надежно и устойчиво работать, сохранять свои технические характеристики при:
 - температуре окружающей среды от -30 до $+50$ °С;
 - давлении окружающей среды (760 ± 40) мм. рт. ст.;
 - относительно влажности воздуха от 20 до 70 %

Общие требования

1. Номинальная скорость пуска и нагружения, в том числе повторного, устанавливается на основании ТУ выбранной силовой установки и генератора. Система и конструкция ГПСУ должны обеспечивать возможность ускоренных пусков и нагружений длительностью не более 5 мин.
2. Время пуска и нагружения ГПСУ должно быть согласованно с условиями работы технологического оборудования.
3. Допустимая пиковая нагрузка не более 10 % от заявленной мощности ГПСУ длительностью не более 1-го часа.
4. Снижение фактической мощности в процессе эксплуатации в течении межремонтного периода не должно превышать 5 % номинальной.
5. При аварийных ситуациях допускается работа ГПСУ в составе миниэлектростанции с частотой более-менее 49 и более 51 Гц.

Требования к системе автоматического управления (САУ)

1. Управление пусками, остановами и работой под нагрузкой осуществляется дистанционно с приборной панели установки.

2. САУ должна обеспечивать:

- автоматический пуск с выходом на режим заданной нагрузки;
- стабилизацию заданного режима;
- автоматическое регулирование частоты вращения;
- контроль параметров ГПСУ;
- аварийную сигнализацию;

3. САУ должна выполнять следующие информационные функции:

- предоставление информации на дисплеи в объеме достаточном для контроля за работой ГПСУ;
- сигнализацию аварийных ситуаций.

4. ГПСУ должна иметь клапан, обеспечивающий полное прекращение подачи топлива по команде САУ.

5. САУ не должна допускать срабатывания автомата безопасности при внезапных набросах и сбросах нагрузки до 2 кВт.

6. Степень статической неравномерности регулирования частоты вращения генераторного вала не должно превышать 7% номинальной частоты вращения.

7. Степень нечувствительности системы регулирования частоты вращения при любой нагрузке не более 1% номинальной частоты вращения.

8. САУ должна обеспечить отключение автономную ГПСУ

9. В начале останова ГПСУ должна отключаться нагрузка.

Требования к сырью, материалам, покупным изделиям

1. Материалы, применяемые в системе, не должны выделять токсичных и взрывоопасных веществ на всех режимах работы и в нерабочем состоянии.

2. Ударостойкость и вибростойкость оборудования системы должны соответствовать требованиям группы ГОСТ для электротехнических установок.

3. Электрическое сопротивление изоляции токоведущих частей оборудования системы относительно корпуса должно быть не менее 20 МОм при нормальных условиях.

4. Электрическая прочность изоляции электрических цепей должна выдерживать испытательное напряжение 1500 В в течение 1 минуты.

Требования к монтажепригодности, ремонтнопригодности, контролепригодности.

1. Система должна быть смонтирована в виде единой конструкции, имеющей крепежные элементы и специальные разъемы для соединения электрических кабелей.
2. Конструктивное оформление системы должно иметь присоединительные силовые элементы (фланцы, уголки и т.д.), позволяющие осуществить ее монтаж.
3. Конструкция должна предусматривать возможность технического осмотра сборочных единиц и деталей в соответствии с регламентом технического обслуживания и ремонта.
4. В объем обслуживания системы могут входить работы по подготовке системы к работе, в том числе проверка функционирования системы.
5. Конструкция оборудования системы должна быть ремонтнопригодной. Ремонт обеспечивается использованием запасных частей (ЗИП).

Требования по надежности и ресурсу.

1. В течении межремонтного периода показатели надежности должны составлять:
 - средняя наработка на отказ 500 ч
 - коэффициент надежности пуска не менее 0,9
 - вероятность безотказной работы системы за время работы в течение 500 ч должно быть не менее 0,95

Ресурс МиниЭС:

- средний ресурс между капитальным ремонтом 2000 ч;
- ресурс до списания 10000 ч.

2. Базовые узлы и детали, имеющие ограниченный ресурс, должны иметь срок службы не менее ресурса между капитальным ремонтом или быть кратными ему.
3. В течение периода работы 2000 ч, а также в период регламентных работ допускается замена отказавших элементов из состава запасных частей (ЗИП).

2 Проблемы построения и совершенствования системы энергообеспечения

Проблемы построения и совершенствования системы энергообеспечения занимают центральное место в комплексе задач, встающих перед конструкторами. Энергоустановка должна обладать высокими удельными показателями по энергоемкости и мощности, быть абсолютно экологичной, герметичной и надежной в эксплуатации.

Одной из основных проблем энергетических установок является обеспечение «пиковых» нагрузок потребителя. Эта задача, обычно решается путем переразмеривания силовой установки. Например, средняя суточная потребляемая мощность составляет 20 кВт. Однако у потребителя существует вероятность включения нескольких потребителей с большой реактивной мощностью одновременно (например, электродвигатели номинальной мощностью 5 кВт). При этом пиковая мощность одного потребителя может составить 20 и более кВт. Известно, что ГПСУ может обеспечить наброс нагрузки не более 30% от номинальной мощности. Исходя из этих условий, минимальная мощность ГПСУ, обеспечивающая стабильную работу потребителя составит не менее 100 кВт. Следует отметить, что с другой стороны, работа ГПСУ с нагрузкой менее 10% от номинальной мощности является неэффективной. Такой режим работы, например, характерен для потребителя в ночное время. Таким образом, необходима разработка конструкции ГПСУ и алгоритмов ее работы обеспечивающих эффективную работу установки на всех режимах. Возможным решением такой задачи, может являться создание гибридной ГПСУ (ГГПСУ). ГГПСУ такого типа позволяет обеспечить эффективность, а самое главное экологичность, на всех режимах ее работы.

2.1 Схема силовой установки ГГПСУ

Принципиальная схема силовой установки представлена на рисунке 2.1

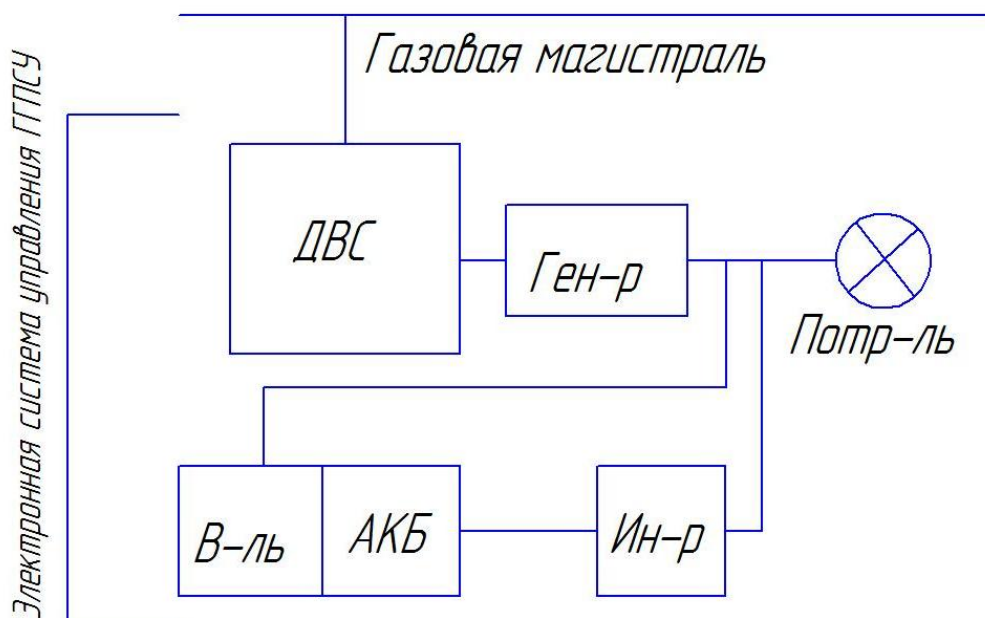


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема ГГПСУ

На рисунке 2.1 приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; Ин-р – инвертер; В-ль – выпрямитель; Ген-р – генератор; Потр-ль – потребитель; АКБ – аккумуляторные батареи.

Установка работает следующим образом. Выделяют три базовых режима работы ГГПСУ:

- первый 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.

- второй 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, также, зарядка аккумуляторных батарей установки.

- третий 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).

Анализ базовых характеристик установки позволяет и режимов ее работы позволяет определить ее «слабые» места с позиции экологичности и эффективности, к которым относится, прежде всего ДВС, а также накопители энергии.

2.2 Типы накопителей энергии гибридных установок

Рассмотрим основные типы накопителей энергии используемых в гибридных стационарных установках.

В настоящее время известно несколько типов источников энергии для. Среди них можно отметить выделить следующие типы:

- электрохимические источники энергии;
- электростатические системы накопления энергии;

Тяговые электрохимические источники энергии разделяются на тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ) и электрохимические генераторы (ЭХГ), формируемые на основе топливных элементов (ТЭ) или комбинированных (полутопливных) элементов [17, 18,19,20] .

Принцип работы ТАБ заключается в многократном режиме циклирования (заряд-разряд) с регенерацией исходных реагентов при заряде. Принцип работы ЭХГ, выполняемых на ТЭ, заключается в разряде за счет непрерывной подачи реагентов к ТЭ извне с одновременным удалением

продуктов реакции. Длительность разряда зависит в этом случае от запаса реагентов (водород-воздух, металл-воздух и т.д.). В случае использования комбинированных элементов (алюминий-воздух, цинк-воздух и т.п.) запас одного из реагентов заключен в систему и возобновляется периодически» [37].

Представление о параметрах перспективных ТАБ, рекомендуемых специалистами НАМИ [17, 20, 21, 22], дает таблица 2.1.

Таблица 2.1 - Основные показатели ТАБ

№	Параметр	Перспектива		Примечание
		2005г.	2016г.	
1	Удельная энергоемкость, Втч/кг (при трехчасовом разряде)	80	200	
2	Удельная объемная энергоемкость, Втч/л	135	300	
3	Удельная мощность, Вт/кг (при 80% разряда за 30 с)	150	400	По методике USA BC
4	Удельная объемная мощность, Вт/л	250	600	
5	Удельная мощность при рекуперации (при 20% разряда за 10 с), Вт/кг	75	200	
6	Срок службы, лет	5	10	
7	Наработка, циклы (при разряде на 80%)	600...800	1000	
8	Снижение энергии и мощности в конце срока службы, % (не более)	20	20	
9	Рабочая температура, °C	-30 +65	-40 +85	
10	Время заряда (нормальное), ч	6	3...6	
11	Стоимость, \$/кВтч (при выпуске 10 000 блоков по 40 кВтч)	150	100	
12	ТАБ должны непрерывный одночасовой разряд на 75% запаса энергии без повреждений			

Степень соответствия современных ТАБ требованиям, приведенным в таблице 2.1, можно оценить путем анализа показателей существующих ТАБ различного типа, сведенных в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Параметры современных ТАБ различного типа

Показатели	Электрохимическая система		
	СКА	НКА	Ni-MH
Среднее напряжение при двухчасовом разряде, В	1,9	1,2	1,2
Удельная энергоемкость, Втч/кг (при пятичасовом разряде)	40	55	80
Удельная объемная энергоемкость, Втч/л (при одночасовом разряде)	70	100	160
Удельная мощность пиковая, Вт/кг	100	100	100
КПД цикла заряд-разряд	0,75	0,6	0,75
Наработка, циклы	500	2000	1500
Время заряда (нормальное), ч	5-8	4-7	3-5
Рабочая температура, °С	-20 +50	-70 +50	-70 +50
Капитальные затраты (по отношению к СКА) на 1 кВтч	1,0	2,6	3,2
Затраты в пробеге (по отношению к СКА) на 1 кВтч	1,0	0,6	0,4

Рассмотрим особенности ТАБ, нашедших применение и электрохимических систем, которые еще будут применяться в ближайшем будущем [21].

2.2.1 Свинцово-кислотные аккумуляторы

Свинцово-кислотные аккумуляторы (СКА) находят широкое применение в современных энергетических установках. В настоящее время предпринимаются усилия по улучшению показателей СКА. Панцирная свинцово-кислотная ТАБ с электродами, погружаемыми в жидкий электролит,

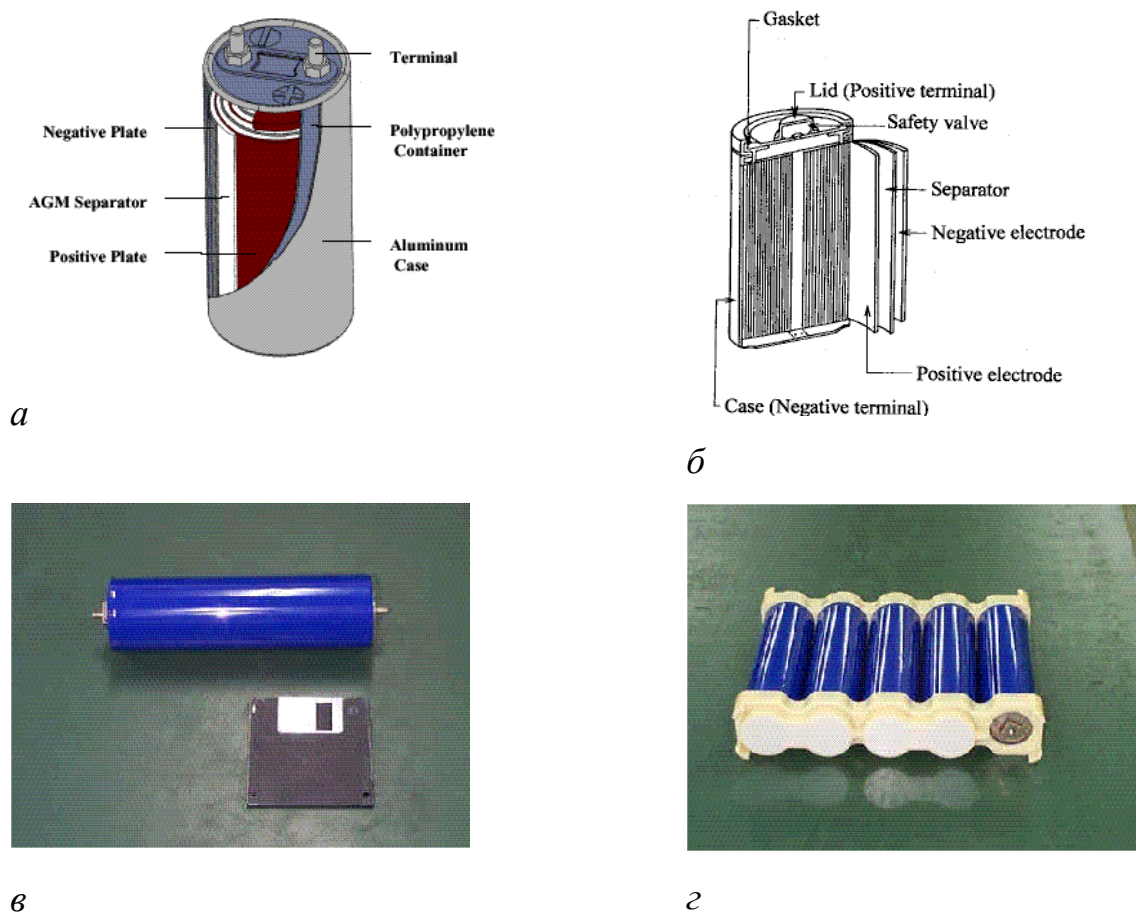
до сих пор является самым недорогим и распространенным источником энергии для существующих и вновь создаваемых электромобилей.

Свинцово-кислотный аккумулятор обладает большой ЭДС (2,1 В на элемент), теоретическая удельная энергоемкость составляет примерно 175 Втч/кг. Срок службы находится в пределах 200-500 циклов для намазных, и от 500 – для панцирных аккумуляторов. Срок службы аккумуляторов такого типа зависит от условий и правильной эксплуатации и может значительно уменьшаться при глубоких разрядах. Средняя удельная мощность СКА составляет около 250 Вт/кг. Специалисты считают, что резервы повышения удельных показателей СКА есть.

Модернизация традиционной технологии изготовления СКА повысила их удельные энергоемкость до 40...50 Втч/кг и мощность до 300 Вт/кг со сроком службы 500...800 зарядно-разрядных циклов. Разработаны импульсные СКА с высокой удельной мощностью (3000 Вт/кг при разряде до 80 % глубины разряда в течение 20с), что позволяет повысить динамичность транспортного средства и возможность применения в качестве импульсного источника совместно с другими более энергоемкими ТАБ. Появляются на рынке СКА с возможностью быстрого заряда. Свинцово-кислотная ТАБ до сих пор является самым недорогим и распространенным источником энергии для существующих и вновь создаваемых электротранспортных средств, в том числе и для напольного внутризаводского электротранспорта.

Приоритет в разработках СКА принадлежит фирмам Sonnenshein (Германия), General Electric, Optima ESC (США) и Crompton Parkinson Ltd. (Англия). Например, свинцово-кислотная ТАБ фирмы Globe (США) имеет следующие удельные показатели: энергоемкость 50 Втч/кг, мощность 100 Вт/кг и срок службы до 700 циклов при остаточной емкости не менее 75% [37].

Несмотря на недостатки, перспективы развития СКА неплохие: по удельным энергоемкости 50...65 Втч/кг и мощности до 300 Вт/кг при ожидаемом сроке службы более 1000 циклов. Разработка новых электродов и сепараторов позволила предложить новую конструкцию СКА – рулонную.



а – конструкция ячейки с отдельными клеммами; *б* – конструкция ячейки с отрицательной клеммой, совмещенной с корпусом; *в* – внешний вид ячейки; *г* – модуль из 5-ти ячеек

Рисунок 2.2 - Рулонный свинцово – кислотный аккумулятор «Оптима»

Устройство конструкции, ячейка и модуль на ее основе рулонного свинцово – кислотного аккумулятора «Оптима» приведены на рисунке 2.2

2.2.2 Никель-кадмиевые аккумуляторы

Никель-кадмиевые аккумуляторы (НКА) предназначены для разностороннего применения и обладают по сравнению с СКА многими преимуществами, такими как долговечность, надежность в эксплуатации, возможность быстрого заряда, более высокая удельная энергия (до 60 Втч/кг).

С точки зрения возможности использования НКА интерес представляют такие качества этих аккумуляторов, как малое обслуживание, отсутствие токсичных выделений, хранение более одного года с электролитом и без него без ухудшения удельных характеристик аккумулятора, морозостойкость электролита и т.п. Однако, никель-кадмиевые аккумуляторы имеют гораздо более высокую стоимость, чем СКА.

НКА типа FNC имеют высокую энергоемкость (70 Втч/кг), большую наработку в циклах заряд/разряд. (4000 циклов при неполном разряде и 2500 циклов при полном разряде), относительно небольшие габариты и длительный срок службы (15-20 лет). Основной отличительной особенностью конструкции электродов ТАБ является их трехмерная никелевая матрица, в которой активный материал полностью и немедленно участвует в электрохимической реакции. Никелевые волокна компактны (в 1 см³ материала содержится 300 м токопроводящих нитей), что обеспечивает малую величину внутреннего сопротивления электрода. Благодаря высокой плотности проводника и малым внутренним потерям НКА с электродами волокнистой структуры могут быть быстро перезаряжены.

НКА – это единственная электрохимическая система, обеспечивающая разряд батарей в широком диапазоне нагрузок: от секундного разряда очень большим током до многочасового разряда малым током. Заряд же ТАБ такого типа может продолжаться от нескольких секунд до минут.

2.2.3 Никель-железные аккумуляторы

Никель-железные аккумуляторы (НЖА) также являются одними из перспективных источников энергии и конкурентоспособны по отношению к

СКА. Это обусловлено, прежде всего, богатыми мировыми запасами железа, необходимого для изготовления железного электрода, неплохими электрическими параметрами (способность выдерживать глубокий разряд), сроком службы, превышающим срок службы других известных систем, в том числе и НКА.

«Никель-железные аккумуляторы конструктивно выполняются в виде погружаемых в жидкий электролит электродов. В сравнении с СКА они имеют больший срок службы, но они значительно дороже и имеют относительно небольшую удельную энергоемкость и удельную мощность. По завершении очередного зарядного цикла необходимо доливать в элементы дистиллированную воду, вследствие чего для этих батарей необходимо иметь систему централизованной заливки электролита. Необходимость удаления водорода также усложняет конструкцию НЖА. Хотя по этим ТАБ ведутся значительные работы, маловероятно, чтобы НЖА получили значительное развитие на перспективу по сравнению с новыми системами, работы по которым начались сравнительно недавно» [37].

В настоящее время разработка лучшей никель-железной ТАБ принадлежит Франции. Совместными усилиями фирм PSA и SAFT создана ТАБ, которая в 2 раза превосходит СКА по сроку службы и удельной энергоемкости. Ее стоимость всего в два раза превышает стоимость СКА.

2.2.4 Аккумуляторы типа «Цинк-бром»

ТАБ типа «Цинк-бром» имеют биполярные угольные электроды со связующим из пластмассы, разделенные сепаратором. «Каждый электрод включен в отдельную камеру, через которую прокачивается электролит. В качестве электролита служит водный раствор бромистого цинка. При заряде со стороны отрицательного электрода откладывается цинк, а со стороны положительного выделяется элементарный бром. Во время разряда вблизи обоих электродов образуются бромистые соединения цинка. ТАБ этого типа имеют высокую удельную энергоемкость (до 72 Втч/кг), но относительно

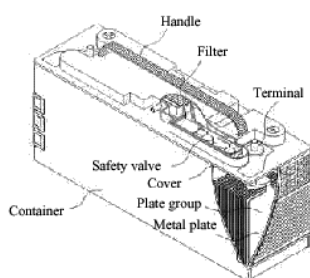
низкую удельную мощность (не более 53 Вт/кг). Учитывая высокую удельную энергоемкость, можно ожидать продолжения работ по этой системе. Однако из-за проблем с недостаточной удельной мощностью, высокой стоимостью (насосы, резервуары, трубопроводы и т.д.), а также склонностью используемых материалов к коррозии маловероятно, что ТАБ типа «Цинк-бром» может стать перспективным источником энергии силовых установок различного назначения» [37].

2.2.5 Литиевые аккумуляторы

Электрохимические системы, основанные на литии (литий-сульфид железа, литий-полимер и др.), считаются одними из самых перспективных. В этом направлении проводятся интенсивные исследовательские работы. Одной из основных проблем, еще не решенных на сегодняшний день, является отвод тепла во время заряда и разряда этих ТАБ.

2.2.6 Никель – металл – гидридные аккумуляторы

В последнее десятилетие настоящий бум испытывают никель – металл – гидридные (рисунок 2.3) аккумуляторы (Ni-MH).



a



б

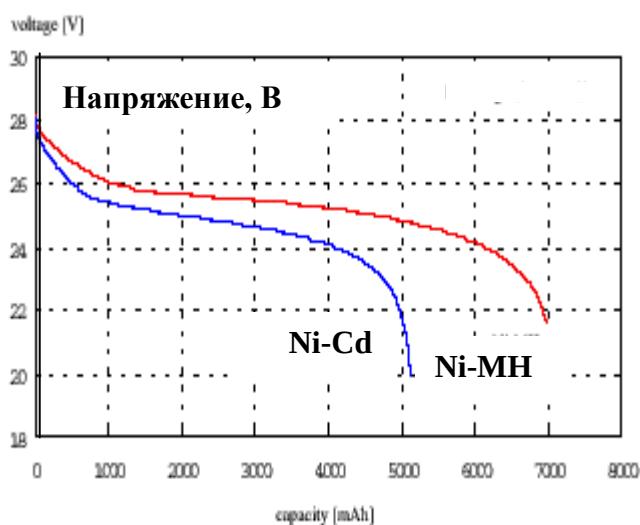
Рисунок 2.3 - Конструкция (*a*) и внешний вид (*б*) Ni-MH батареи фирмы YASSA (Япония)

Интенсивно ведутся работы по совершенствованию технических параметров и разворачиванию производства таких ТАБ. Наибольших успехов в изготовлении Ni-MH добилась фирма Ovonic, США. Они выпускают

аккумуляторы с удельными показателями: 80 Вт.ч/кг, (при 90% глубине разряда), 260 Вт/кг (при 100% степени заряженности) и 600 циклов. К преимуществам НМГА относятся отсутствие токсичных выделений, надежность в эксплуатации, безуходность обслуживания.

На рисунке 2.4 и в таблице 2.3 приведено сравнение вольт–амперных характеристик и основных параметров Ni-Cd и Ni-MH аккумуляторов.

ТАБЛИЦА 2.3 -СРАВНЕНИЕ NI-CD И NI-MH АККУМУЛЯТОРОВ



	Ni-Cd аккумулятор	Ni-MH аккумулятор
Напряжение, В	1,2	1,2
Емкость, Ач	5	7
Диаметр, мм	32,3	32,3
Высота, мм	58,4	58,4
Масса, г	150	170

Рисунок 2.4 - ВАХ НКА и НМГА

2.2.7 Оценка электрохимических систем по отношению к параметрам традиционного свинцово-кислотного аккумулятора

Оценка значений основных параметров ТАБ рассмотренных электрохимических систем по отношению к параметрам традиционного свинцово-кислотного аккумулятора дана в таблице 2.4 [17].

Таблица 2.4 - Относительные параметры ТАБ различных систем

Тип ТАБ	СКА	НЖА	НМВА	Цинк-бром	НС А	Литий-полимер
относительная удельная энергоемкость	1.0	1.5	1.7	2.2	2.5	4.0
относительная удельная мощность	1.0	1.2	2.1	0.6	1.1	3.5
относительное значение запаса хода	1.0	2.0	2.3	2.1	3.4	4.0
КПД по энергии, %	68	58	76	75	91	85

Таблица 2.4 свидетельствует о бесспорной перспективности электрохимических систем, основанных на литии.

2.3 Электростатические системы накопления энергии

Электростатические системы накопления энергии или просто емкостные накопители энергии (ЕНЭ) большой емкости конструктивно состоят из твердых тонких высокопористых электродов, разделенных слоем жидкого электролита и сепаратором [23, 24]. «Действие ЕНЭ основано на свойствах двойного слоя полярных молекул (диполей), образующихся в электролите на границе с поверхностью пор каждого из электродов при заряде ЕНЭ. Благодаря значительной площади поверхности пор (углеграфита), двойной слой диполей обладает электрической емкостью, намного большей, чем у обычных конденсаторов. Емкостной накопитель энергии отличаются от обычного аккумулятора прежде всего тем, при его заряде и разряде отсутствуют химические реакции, требующие некоторого количества дефицитных и дорогостоящих металлов, и не выделяются какие-либо продукты реакций. Однако, поскольку запас энергии электростатических систем накапливается в электрической емкости его двойного слоя, характеристики и возможности ЕНЭ существенно отличаются от характеристик и возможностей ТАБ» [37].

Основными преимуществами ЕНЭ по сравнению с ТАБ является экологическая чистота, высокая динамичность (они способны быстро заряжаться), безуходность и большой срок службы. Свойства ЕНЭ быстро заряжаться означает возможность использования энергии рекуперации при торможении транспортного средства путем аккумуляции ее в конденсаторе [37].

Основные свойства изготовленных и разработанных к настоящему времени отечественных ЕНЭ представлены в табл. 2.5 [25, 26].

К настоящему времени накоплен значительный опыт использования ЕНЭ в системах стартерного пуска и зажигания двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [23,26]. Также активно прорабатываются вопросы применения ЕНЭ в различных электротранспортных средствах, в том числе на напольном внутризаводском электротранспорте.

Таблица 2.5 - Параметры некоторых существующих ЕНЭ

№	Изготовитель	Тип ЕНЭ	Параметры					
			U _н , В	С, Ф	W, кДж/кг	τ _{енэ} , с	масса, кг	объем, дм ³
1	«Композит» Москва	НСД 14/1	14	200	3,9	0,34	5	3,2
2	«Эконд», Москва	ИКЭ 9/14	14	100	0,75	1,0	12	4
3	«Эконд», Москва	МИГ 20/24	24	100	1,24	0,8	24	12
4	«Инкар», Калининград	-	18	1800	6,5	-	3,9	1,6
5	«Элит», Курск	Унифицир. модуль	24	145	2,3	-	18	11
6	«Эсма», Москва	50КДЭС-30	85	2600	7,1	-	125	80
7	НИИЭИ, Электроугли	-	150	60	5,3	4	130	90

При питании тягового электродвигателя в ЭМ от ЕНЭ время заряда значительно меньше времени разряда накопителя. Это радикальным образом влияет на работу энергоустановки, что и требует проведения комплексных исследований системы энергообеспечения электротранспортных средств с ЕНЭ [27 - 31]. В то же время, при использовании в электромобилях ЕНЭ и разряде его, может быть использована лишь часть запасенной в накопителе энергии – при напряжении более 0,5...0,7 номинального значения.

3 Результаты испытаний системы ГСГ-ДВС

3.1 Объект испытаний

Объектами испытаний являлся генератор СГ, реализующий принцип воздушной паровой конверсии природного газа и поршневой ДВС, конвертированный для работы на природном газе.

Конструкция, принцип работы, условия функционирования генератора СГ разработаны ИК СО РАН. Генератор был поставлен в комплекте, обеспечивающем его работоспособность в течение срока испытаний в моторном боксе, и включал: каталитический блок, систему измерения воздуха и регулирования расхода метана, систему (элементы) управления работой генератора с необходимыми для обеспечения функционирования генератора датчиками и устройствами (термопарами, манометрами, ротаметрами и т.д.), соединительную арматуру.

Испытуемый ДВС типа ВАЗ-21114 представлял собой 4-х тактный, 4-х цилиндровый двигатель рабочим объёмом $V_h = 1,6$ л. с искровым зажиганием, системой впрыска топлива, электронной системой управления (ЭСУД) и был дооборудован системой для работы на сжатом природном газе (метане) фирмы ELPIGAZ (Польша). Степень сжатия двигателя была оптимизирована для работы на сжатом природном газе до $\varepsilon = 12$.

3.2 Методика проведения испытаний

Для проведения испытаний моторный бокс дополнительно к стандартному оборудованию (ГОСТ 14846-81) был оснащен системами подачи сжатого природного газа в ДВС, системой электронного управления подачей природного газа, схема которой представлена на рисунке 3.1, генератором СГ, системами подачи газа и воздуха в генератор СГ и системой сигнализации утечек природного газа. Общая схема бокса приведена на рисунке 3.1.



ГТ – гидротормоз фирмы «SHENK»;

БГФ – блок газовых форсунок;
М1,...М3 – манометры;
Т1, Т2 – термопары типа ХК;
Р1,...Р3 – редукторы давления газовые;
РВ – редуктор давления воздушный;
К1,...К4 – вентили;
ПК – предохранительный клапан;
ГСГ – генератор синтез-газа;
Комп-р – воздушный поршневой компрессор;
Г-р – газоанализаторы;
ДЗ – дроссельная заслонка;
ДВ1, ДВ2 – термоанемометрические датчики расхода воздуха;
БУ – блок ЭСУД «Январь 4.0».

Система подачи природного газа включает баллон высокого давления, редуктор высокого давления Р1 редуцирующий давление в газовой магистрали до 1,5 МПа, редуктор давления Р2 снижающий давление в газовой магистрали ДВС до $P \leq 0,185$ МПа, манометры М1 и М2. Подача природного газа в двигатель осуществляется блоком газовых форсунок БГФ, который управляется контроллером.

Система подачи природного газа в генератор СГ включает газовый редуктор Р3, установленный в газовой магистрали после редуктора высокого давления Р1 и редуцирующий давление до $P \leq 0,185$ МПа, манометр М3, регулирующий вентиль К3 и ротаметр.

Система подачи воздуха в генератор СГ состоит из воздушного компрессор поддерживающий давление в ресивере 0,6-1,0 МПа, воздушного редуктора РВ редуцирующего давление в воздушной магистрали до 0,2 МПа, регулирующего вентиля КВ, датчика расхода воздуха термоанемометрического типа ДВ2 и преобразователя типа «Протерм».

Работа системы осуществляется следующим образом. Открытием ПК и редуктора Р1 заполняется расходная ёмкость РЕ объемом 41,5 л. После установки рабочего давления в РЕ открываются редукторы Р2 и Р3 которые обеспечивают подачу природного газа к ДВС и ГСГ с заданным давлением. Далее производился пуск ГСГ. Для этого с помощью вентиля К3 подавался в заданном количестве метан. Расход метана определялся с помощью ротаметра установленного в газовую магистраль. Необходимый для работы ГСГ воздух подавался из компрессора через воздушный редуктор РВ. Расход воздуха определяется датчиком расхода воздуха ДВ2. Регулирование работы ГСГ осуществляется путем совместного открытия и закрытия вентилей К3 и КВ, которые определяют количество подаваемого в ГСГ воздуха и метана и их соотношение. После установки заданного режима работы ГСГ производится пуск ДВС. Управление двигателем осуществлялось штатной ЭСУД на базе контроллера Январь 4.0 посредством эмулятора, управляющего газовыми форсунками БГФ.

Подача СГ в двигатель осуществлялась вентилями К4 и К1: при запуске генератора и его отладке (без работы ДВС) вентиль К1 закрыт, а вентиль К4 открыт и СГ выпускался в атмосферу, где он сжигался в газовой горелке; при работе двигателя СГ подавался во впускную трубу двигателя перед дроссельной заслонкой при этом вентиль К1 открыт, а вентиль К4 закрыт.

Экспериментальные работы проводились в несколько этапов.

На первом этапе испытаний проводился монтаж систем в моторном боксе, отладочные работы отдельных элементов систем, работы по калибровке измерительной и регулирующей аппаратуры, контроль герметичности газоподводящих магистралей, а также снятие базовых регулировочных характеристик двигателя по составу смеси.

После сборки и поэлементной отладки стендовых систем и генератора СГ производились предварительные испытания, в результате которых определялись и уточнялись необходимые параметры и настройки генератора СГ и ДВС.

Испытания проводились на режимах работы ДВС указанных в таблице 3.1. При этом производилась проверка функционирования электронной системы подачи природного газа в ДВС, а также отрабатывались методы измерения требуемых параметров работы ДВС.

Таблица 3.1 - Режимы работы двигателя

№	Частота вращения коленчатого вала n , об/мин	Нагрузка P_e , МПа
1	850	0 (XX)
2	1380	0 (XX)
3	2185	0,19
4	2185	0,2
5	3277	0,33

При выполнении экспериментальных работ ГСГ устанавливался на стационарный режим работы. Химический анализ состава синтезгаза производился проточными газоанализаторами водорода АГ-12 и оксида углерода ГИАМ-14. В ходе испытаний устанавливалось оптимальное соотношение, по качеству конверсии, воздух/метан при различных расходах метана.

На втором этапе проводились совместные испытания системы ГСГ и ДВС. Испытания проводились в следующей последовательности. Включался ПК (см. рисунок 1) и редукторы Р1 и Р3. Затем производился пуск ГСГ в соответствии с методикой, разработанной изготовителем. После установки стационарного режима работы осуществлялся пуск и прогрев ДВС до рабочей температуры $T_{дв} = 90 - 95$ °С. Затем после установки заданного режима работы двигателя, во впускную трубу путем переключения вентилей К3 и К4 подавался СГ и производилось снятие регулировочных характеристик по составу смеси.

При проведении испытаний регистрировались параметры ДВС предусмотренные ГОСТ 14846-81. Кроме этого, проводились измерения величин характеризующих работу системы ГСГ-ДВС, которые приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Метрологическое обеспечение испытаний

№	Параметр		Прибор	Основная погрешность измерений
	Название	Обозначение		
1.	Содержание несгоревших углеводородов в ОГ ДВС	CH, ppm	Газоанализатор «МЕТА»	± 5 %
2.	Содержание окиси углерода в ОГ ДВС	CO, %		± 5 %
3.	Содержание оксида азота в ОГ ДВС	NO _x , ppm		± 5 %
4.	Содержание свободного кислорода в ОГ ДВС	O ₂ , %		± 5 %
5.	Коэффициент избытка воздуха	λ		Не нормируется
6.	Температура ГСГ	T1, T2, °C	УКТ-38 Щ4	± 1 %
7.	Расход воздуха через ГСГ	Gв, кг/ч	Измерительный комплекс «Протерм»	
8.	Расход метана через ГСГ	Gг, кг/ч	Ротаметр №8010955	не более ± 5 %
9.	Время выхода ГСГ на стационарный режим работы.	τ, с	-	± 5 с
10.	Содержание окиси углерода в СГ	CO, %	ГИАМ-14	не более ± 5 %
11.	Содержание водорода в СГ	H ₂ , %	A 0012	не более ± 5 %
12.	Время падения давления в расходной емкости*	τ, с	-	± 0,5 с
13.	Давление в газовой магистрали высокого давления	P1, МПа	манометр	Класс точности 0,3
14.	Давление в газовой магистрали подачи природного газа в ДВС	P2, МПа	манометр	Класс точности 0,3
15.	Давление в газовой магистрали подачи природного газа в ГСГ	P3, МПа	манометр	Класс точности 0,3
16.	Давление в ГСГ	P4, МПа	манометр	Класс точности 0,3

* - Система ELPIGAZ предназначена для использования на широкой гамме автомобилей по литражу и предусматривает в своем алгоритме корректировку под каждый конкретный двигатель. В настоящее время система находится на стадии опытного внедрения на российском рынке и впервые применялась на двигателе ВАЗ. Для количественной оценки расхода топлива перед проведением и в процессе испытаний системы ДВС-ГСГ были выполнены работы по получению расходной характеристики газовых форсунок двигателя, которые определялись объемным способом. Перед началом проведения тарировок, с целью определения точности измерений данным способом, были выполнены сравнительные измерения ротаметром и применяемой системой. Полученный результат показал сходимость двух способов измерений с отличием в показаниях менее 1%, что позволило в дальнейшем использовать примененный метод измерений в последующих работах, который заключался в следующем:

Расход природного газа определялся по продолжительности падения давления в расходной емкости РЕ. При отключении предохранительного электроклапана ПК (см. рисунок 3.1) происходило разобщение баллона для хранения природного газа от магистрали подачи газа в ДВС. По мере расходования газа из РЕ давление в магистрали снижалось от величины p_1 до p_2 . Объемный расход газа определялся по формуле:

$$G_{np.g.} = \frac{V \cdot (p_2 - p_1)}{\tau}, \quad [M^3/ч]$$

где, V- объем расходной емкости;

p_2, p_1 – начальное и конечное давление;

τ - время замера.

Расходная характеристика газовых форсунок представлена на рисунке 3.2 и представляет собой зависимость объемного часового расхода газа от показаний расхода бензина (при проведении испытаний возможно управление двигателем только через бензин), определенных по контроллеру ЭСУД

двигателя. В последующих работах расход газа через двигатель определялся по полученной зависимости.

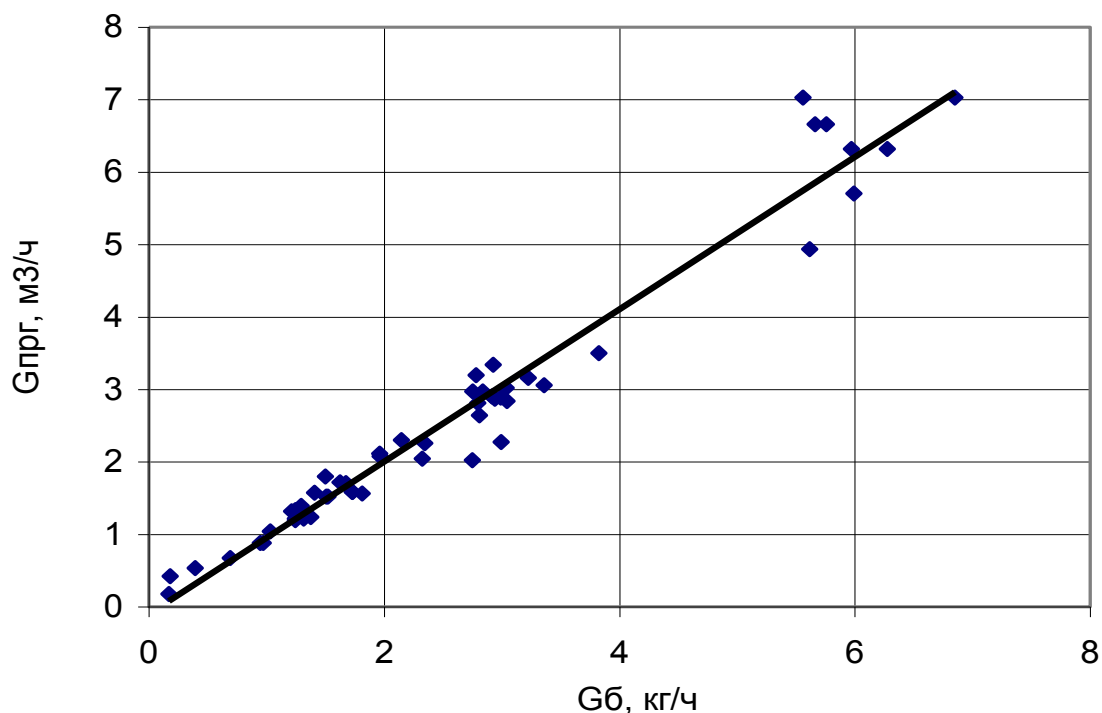


Рисунок 3.2 - Расходная характеристика форсунки

3.3 Результаты испытаний

В соответствии с программой испытаний экспериментальные работы выполнялись путём снятия регулировочных характеристик по составу смеси на различных режимах работы двигателя внутреннего сгорания и оптимальных углах опережения зажигания (УОЗ). Первичные результаты испытаний представлены в таблице 1-4 приложения А.

В таблице 1 приложения А приведены исходные характеристики двигателя (при работе на природном газе) для режимов работы, на которых оценивалась эффективность работы системы ДВС - ГСГ, в таблице 2 указанного приложения - результаты при работе двигателя с добавкой синтез газа к основному топливу, а в таблице 3 результаты, полученные при его работе на синтез газе. На рис. 3.3 - 3.12 представлены соответствующие данные

таблиц 1-3 приложения А. При этом в таблицах и на рисунках использовались следующие обозначения: СГ – синтезгаз; прг. – природный газ; n [мин⁻¹] – обороты ДВС; p_e [МПа] – среднее эффективное давление нагрузки на ДВС; $G_{\text{прг}}$ [кг/ч] – расход природного газа; G_v [кг/ч] – расход воздуха ДВС; $G_{\text{прг_гсг}}$ [кг/ч] – расход природного газа ГСГ; $G_{v_гсг}$ [кг/ч] – расход воздуха ГСГ; H_2 [%] – процентное содержание водорода в синтез газе; $CO_{\text{сг}}$ [%] – процентное содержание оксида углерода в синтез газе; H_2 [кг/ч] – содержание водорода в синтез газе; CO [кг/ч] – содержание оксида углерода в синтез газе; CH_4 [м³/ч] – содержание метана в синтез газе; $Q_{\text{сг}}$ [МДж/ч] – теплота, подведенная в ДВС с синтез газом; $Q_{\text{гсг}}$ [МДж/ч] – теплота, подведенная в ГСГ с топливом; Q [МДж/ч] – теплота, подведенная в ДВС с топливом; Q_{sigma} [МДж/ч] – теплота, подведенная в систему ДВС-ГСГ с топливом; η - КПД генератора СГ; $\gamma_{\text{ОЗ}}$ [гр пкв] – оптимальный угол опережения зажигания; λ - коэффициент избытка воздуха по газовому анализу; O_2 [%] – содержание кислорода в ОГ; CO [%] – содержание оксида углерода в ОГ; CH [ppm] – содержание углеводородов в ОГ; NO_x [ppm] – содержание оксида азота в ОГ; CO_2 [%] – содержание двуоксида углерода в ОГ.

При выполнении работ для измерения состава ОГ использовались два газоанализатора (г/а): –производства ООО «МЕТА» (г. Жигулевск, Самарская обл.), обозначенный МЕТА и г/а импортного производства в обозначенный как ГА.

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

Из данных таблицы 4 приложения А можно видеть, что генератор СГ обеспечил выход СГ, состоящего, в среднем, из, примерно, 27,5% водорода и

9% оксида углерода (максимальные значения выхода водорода составило 30,2%). Кроме того, при его работе наблюдалось наличие метана.

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

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

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

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

Введя в рассмотрение понятие КПД генератора СГ, можем получить:

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

$$Q_{ГCG} = \frac{Q_{CG}}{\eta},$$

где G_i – расход природного газа потребителями системы ГСГ-ДВС;

H_u – низшая теплотворная способность природного газа;

G_j и H_{uj} – расход и низшая теплотворные способности, входящих в состав синтез газа горючих веществ, в частности, водорода, оксида углерода и метана (расход см. в таблицу 4 Приложения А);

G_{npz} – расход природного газа, расходуемого ДВС;

η – КПД преобразования углеводородного топлива в синтез газ, определённый по методике ИК СО РАН.

В таблице 4 приведены соответствующие значения расчетных величин, определенных по данным формулам.

3.3.1 Результаты испытаний при работе двигателя на холостом ходу и их анализ

На рисунках 3.3 - 3.6 приведены результаты испытаний ДВС при работе на режиме холостого хода (ХХ) при частоте вращения коленчатого вала 850

мин⁻¹ и 1380 мин⁻¹. При этом, сравнительные испытания на режиме 1380 мин⁻¹ выполнены при работе двигателя только на СГ.

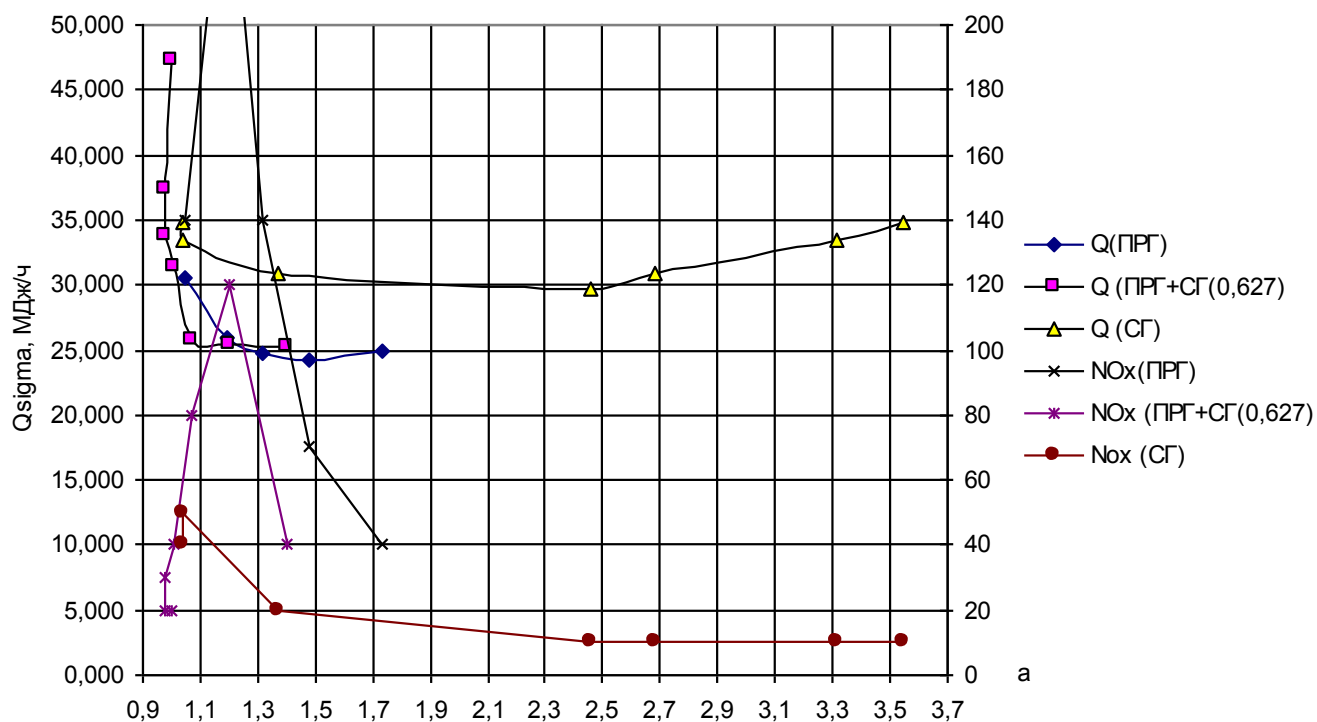


Рисунок 3.3 - Регулировочная характеристика $n = 850 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0$

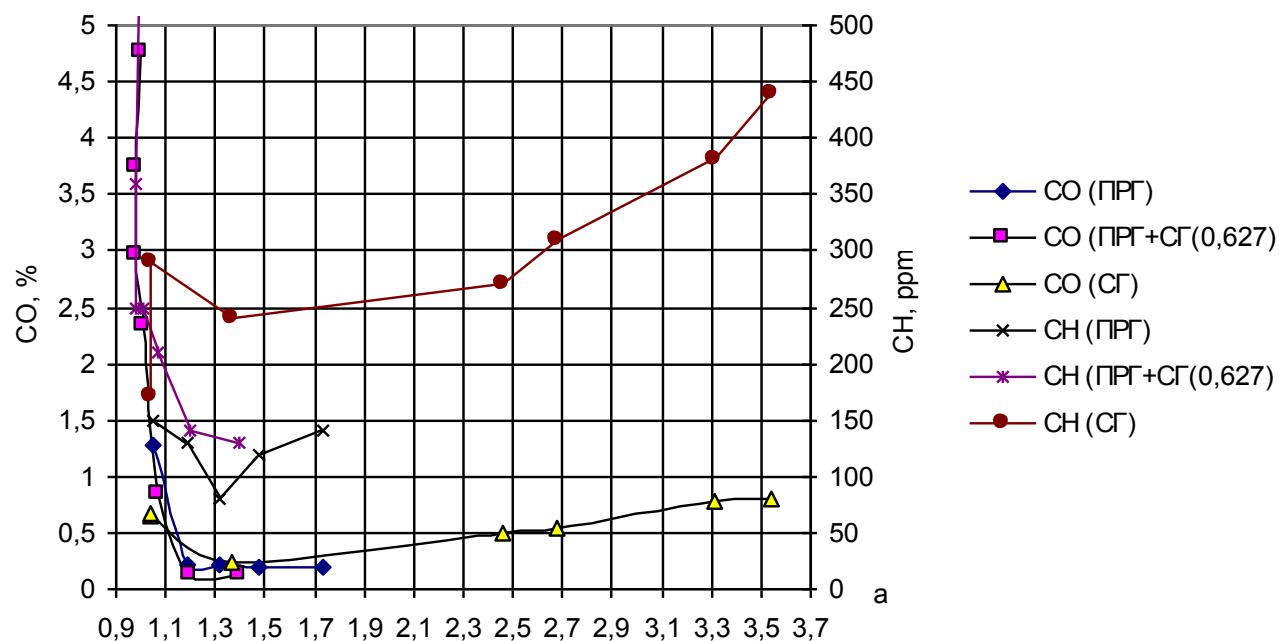


Рисунок 3.4 - Регулировочная характеристика $n = 850 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0$

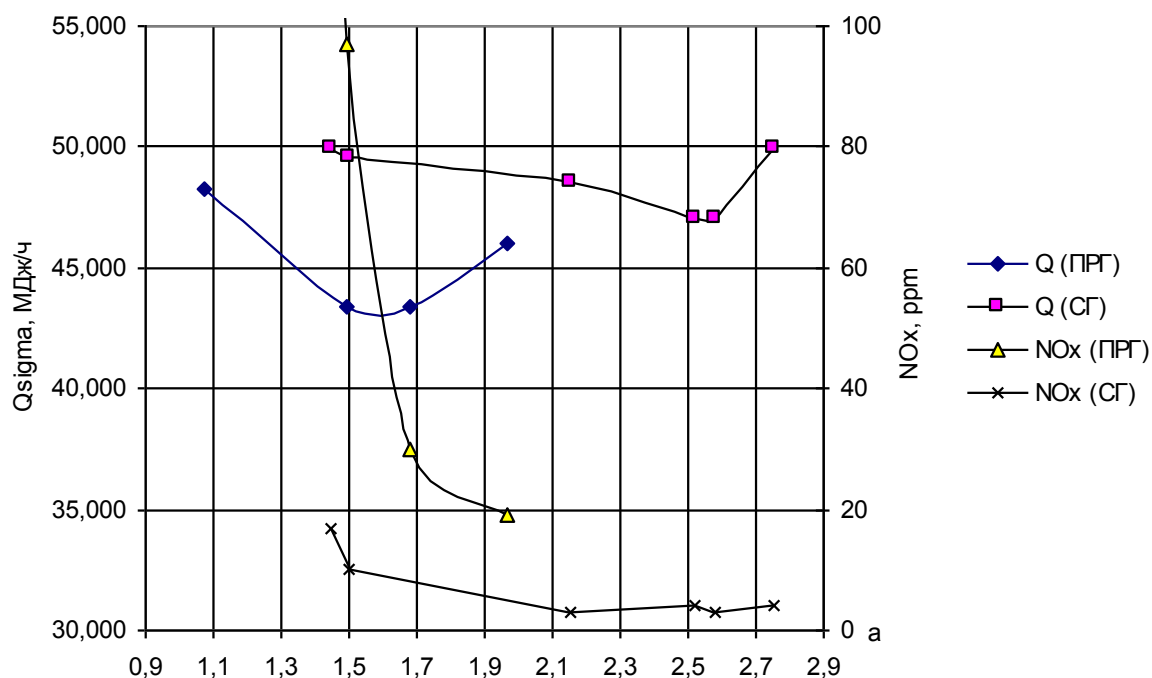


Рисунок 3.5 - Регулировочная характеристика $n = 1380 \text{ мин-1}$, $Pe = 0$

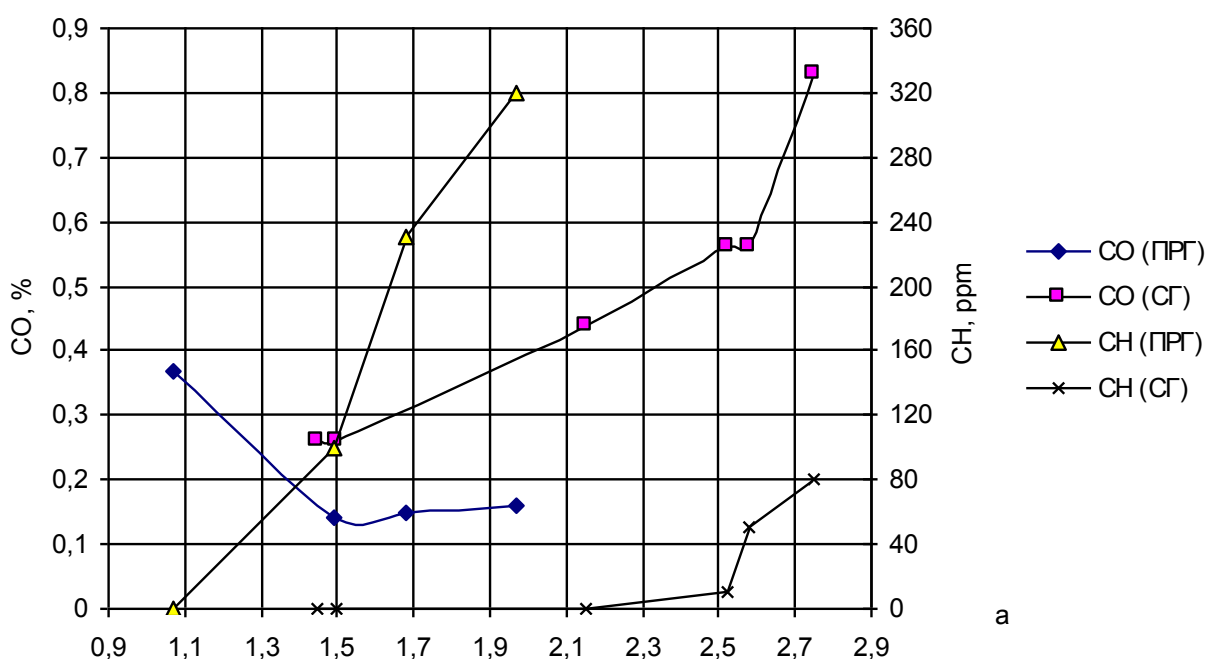


Рисунок 3.6 - Регулировочная характеристика $n = 1380 \text{ мин-1}$, $Pe = 0$

Сравнение результатов работы двигателя на природном газе и при использовании СГ по подведённой теплоте в систему ДВС-ГСГ Q_{sigma} (рисунки 3.3, 3.5) показывает, что при использовании СГ в качестве добавки к основному топливу эффективность системы осталась примерно на том же уровне. Однако

работа двигателя только на синтез газе сопровождается увеличением суммарного потребления тепла Q_{σ} системой ДВС-ГСГ примерно на 21 % при $n=850 \text{ мин}^{-1}$. Данный результат может быть объяснен значительными относительными потерями тепла на конверсию природного газа, которые происходят в ГСГ, а также особенностями протекания рабочего процесса двигателя при питании его синтез газом (в первую очередь кинетикой горения смеси газов).

Как следует из данных графиков, при работе двигателя на данных режимах при его питании синтез газом происходит расширение области устойчивой работы двигателя (по λ) до значения $\lambda = 2,5$. При этом следует отметить, что данные значения λ определяются возможностями данной конструкции генератора СГ (режимом работы ГСГ, составом получаемого СГ) и диапазон λ может быть расширен.

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

Из рассмотрения данных таблиц 2 и 3 приложения А, и рисунков 3.3, 3.5, можно видеть, что при работе двигателя с применением СГ, объемное содержание токсичного компонента NO_x в отработавших газах ОГ, при одном и том же коэффициенте избытка воздуха λ снижается по мере возрастания доли СГ в топливе, что можно объяснить присутствием в СГ балластных компонентов (азот, вода), снижающих температуру горения. С обеднением смеси количество окислов азота снижается, достигая фактически нулевых значений при работе двигателя на СГ при $\lambda = 2.0 - 2.1$.

Рассмотрение графиков рисунков 3.4 и 3.6 показывает, что при работе двигателя на данных режимах на синтез газе, происходит увеличение объёмного выброса нормируемого компонента СО в 1.5 -2 раза и увеличиваются по мере обеднения рабочей смеси. Характер же изменения

выбросов СН не однозначен и зависит от оборотов двигателя, например, его выбросы возросли (в 2.5 раза выше, чем базовый вариант) при всех составах рабочей смеси при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$, а при более высоких скоростных режимах двигателя, также как и при большей нагрузке, уровень выбросов СН остается значительно ниже, чем базовый, а на некоторых режимах регистрировался нулевым, вплоть до наступления пределов устойчивой работы ДВС. Данный факт, как можно предположить, объясняется более высокими температурами ОГ на выпуске, возрастающими с увеличением частоты вращения и нагрузки на двигатель, и требует специального изучения и объяснения.

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

Результаты испытаний на данном режиме (при двух нагрузках) приведены на рисунках 3.7 - 3.10 и в таблицах 1 - 3 приложения А. Отметим, что испытания на данных режимах проводились при работе двигателя на природном газе с добавками СГ ($P_{\text{сг}} = 0.19 \text{ МПа}$) и на питании его только СГ ($P_{\text{сг}} = 0.2 \text{ МПа}$).

Из рассмотрения графиков рисунка 3.7 можно видеть, что подведённая в цилиндры ДВС теплота Q_{sigma} при постоянном количестве подаваемого синтез газа монотонно снижается по мере возрастания λ , однако, на данном режиме максимальная эффективность не была достигнута, тем не менее оценка полученной зависимости позволяет предположить о возможном снижении Q_{sigma} на 5-10% при данном режиме. При этом эффективность системы остается одинаковой во всем рассматриваемом диапазоне коэффициента избытка воздуха.

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

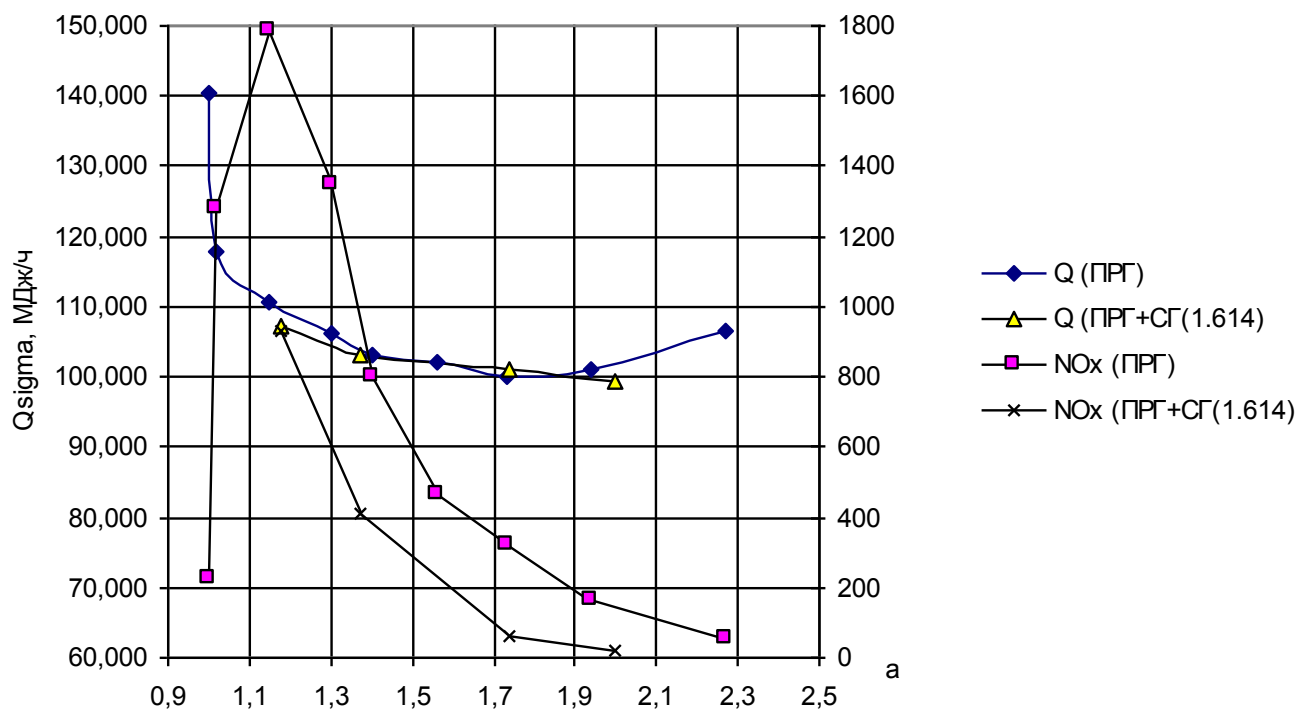


Рисунок 3.7 - Регулировочная характеристика $n = 2185 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0,19 \text{ МПа}$

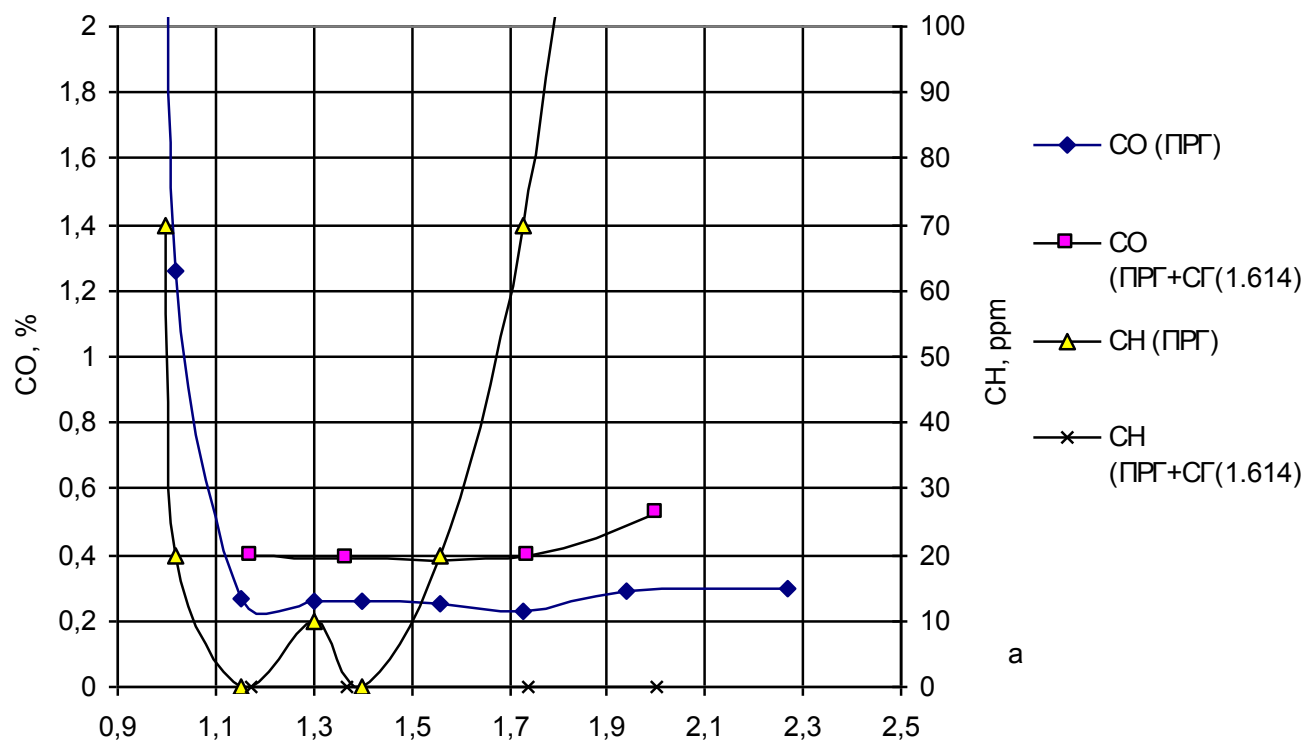


Рисунок 3.8 - Регулировочная характеристика $n = 2185 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0,19 \text{ МПа}$

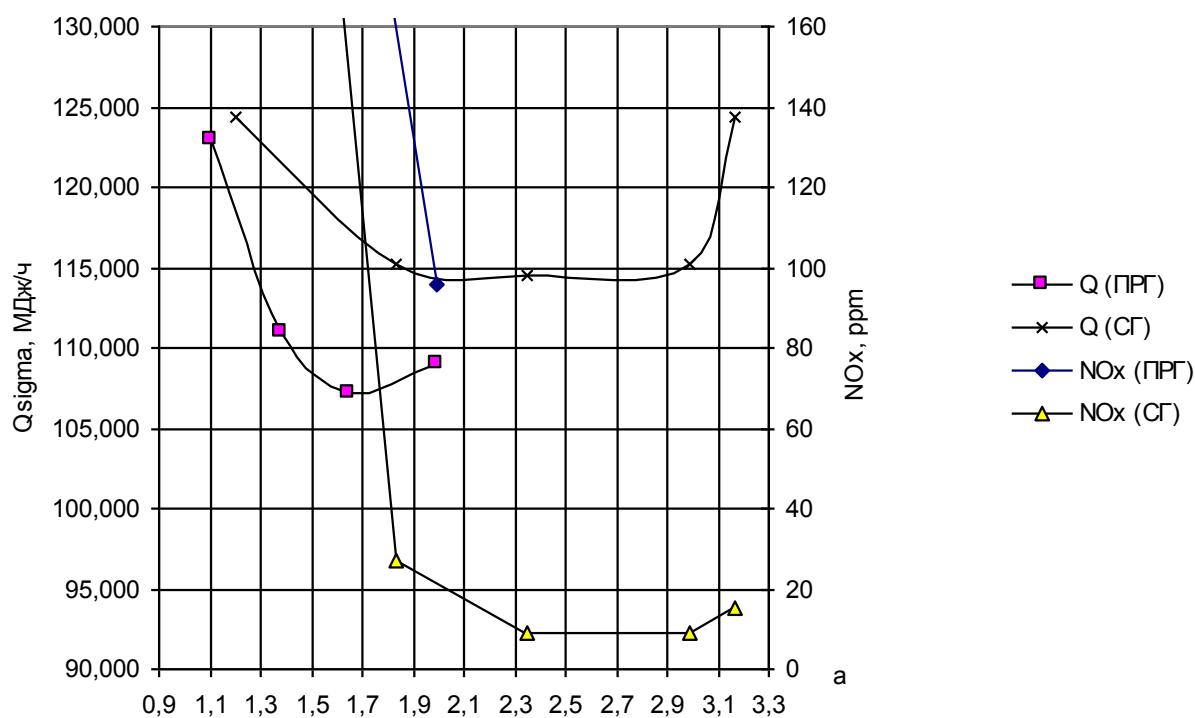


Рисунок 3.9 - Регулировочная характеристика $n = 2185 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0,2 \text{ МПа}$

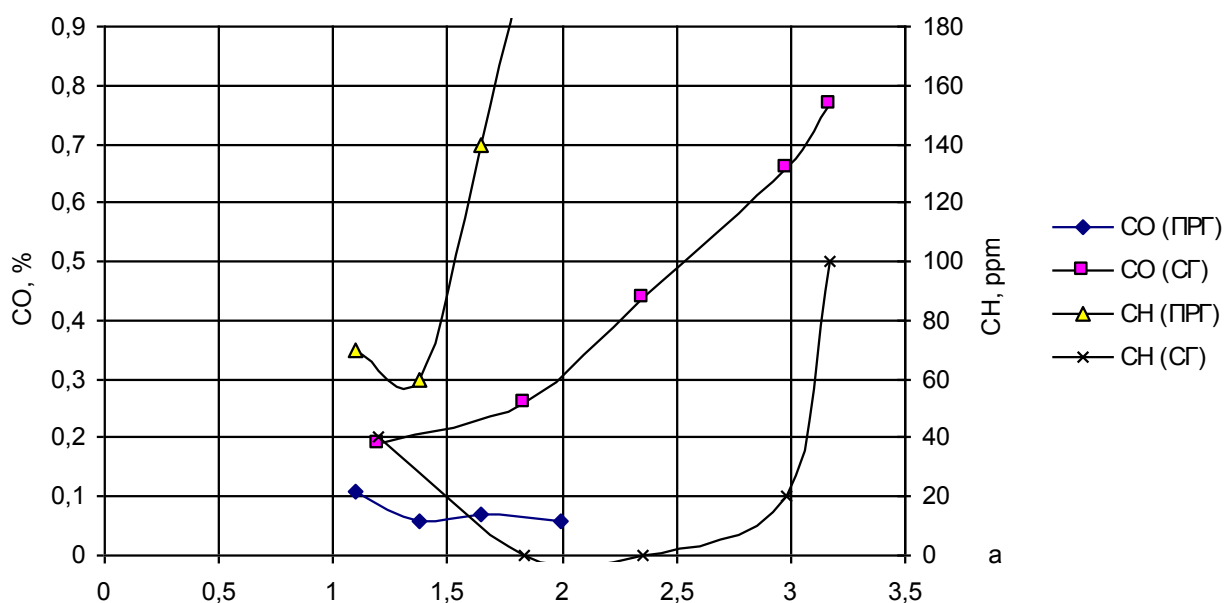


Рисунок 3.10 - Регулировочная характеристика $n = 2185 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0,2 \text{ МПа}$

Рассмотрение графиков рисунков 3.7 и 3.9 показывает, что как при работе двигателя с добавкой СГ, так и при его работе на СГ наблюдается значительное снижение объёмных выбросов NO_x , как при определенном λ , так и по мере его возрастания, с достижением уровня выбросов 20 ppm в районе λ

= 2.0.

Объёмные выбросы СН (рисунки 3.8 и 3.10) при применении СГ по сравнению с работой двигателя только на природном газе уменьшились до нулевого значения и начинают возрастать фактически при том же λ , когда наступает предел устойчивой работы, совпадающий с началом возрастания расхода топлива.

Объёмные выбросы СО возросли по сравнению с базовым вариантом в 1.5 – 4 раза. Причины данного факта, как можно предположить, заключаются в условиях протекания процесса сгорания в ДВС (например, присутствие паров воды может образовать местное не догорание топлива) и влиянием состава используемого топлива, т.е. природного газа и синтез газа. В связи с этим был проведен анализ состава ПГ, который приведен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Состав природного газа используемого при испытаниях

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

3.3.3 Результаты испытаний при работе двигателя на режиме,

характеризуемом частотой вращения $n = 3277 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузкой $P_e = 0,33 \text{ МПа}$ и их анализ

Регулировочные характеристики, полученные на данном режиме работы двигателя, представлены на рисунках 3.11 - 3.12 и в таблицах 1-3 приложения А. Исследования проводились только с добавкой синтез газа.

Из рассмотрения графика рисунка 3.11 можно видеть, что применение добавок СГ приводит к сохранению подведённой в ДВС с топливом теплоты на уровне, примерно, $Q_{\text{sigma}} = 206 \text{ МДж}$, что равно минимально достигаемому на природном газе. При этом эффективное значение λ смещается в бедную сторону до значений, примерно, равных $\lambda = 2.0$. При этом уровень выбросов

NO_x составляет 25 ppm. Дальнейшее увеличение расхода СГ позволит расширить предел обеднения с одновременным повышением экономичности.

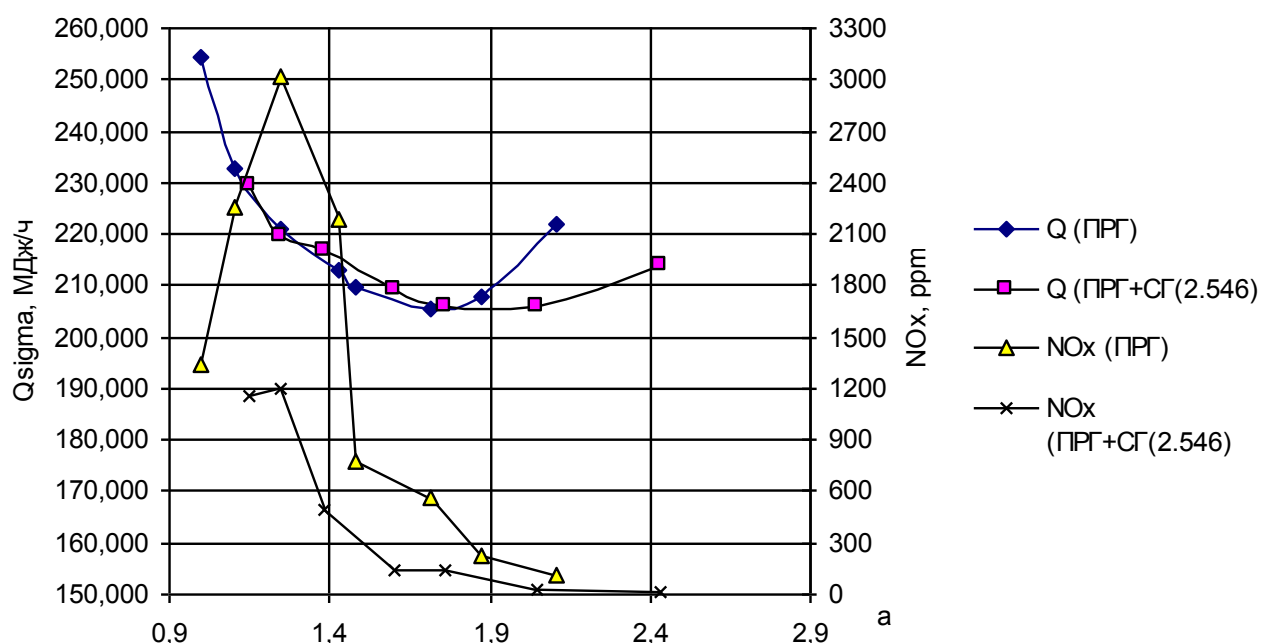


Рисунок 3.11 - Регулировочная характеристика $n = 3277 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0,33 \text{ МПа}$

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

Результаты рисунка 3.12 показывают возрастание объемных выбросов СО при изменении коэффициента избытка воздуха. Его уровень возрос до величины 0.08% по сравнению с базовым (регистрировался равным нулю) и монотонно возрастает с обеднением. Характер данной зависимости объясняется понижением температуры сгорания, особенно с обеднением смеси (что подтверждается снижением NO_x), что определяет не догорание топлива в цилиндре ДВС. Сравнение данного режима двигателя с режимами при меньшей нагрузке также показывает, что величина объемных выбросов СО значительно меньше, что связано с более высоким уровнем температур рабочего тела в процессе сгорания.

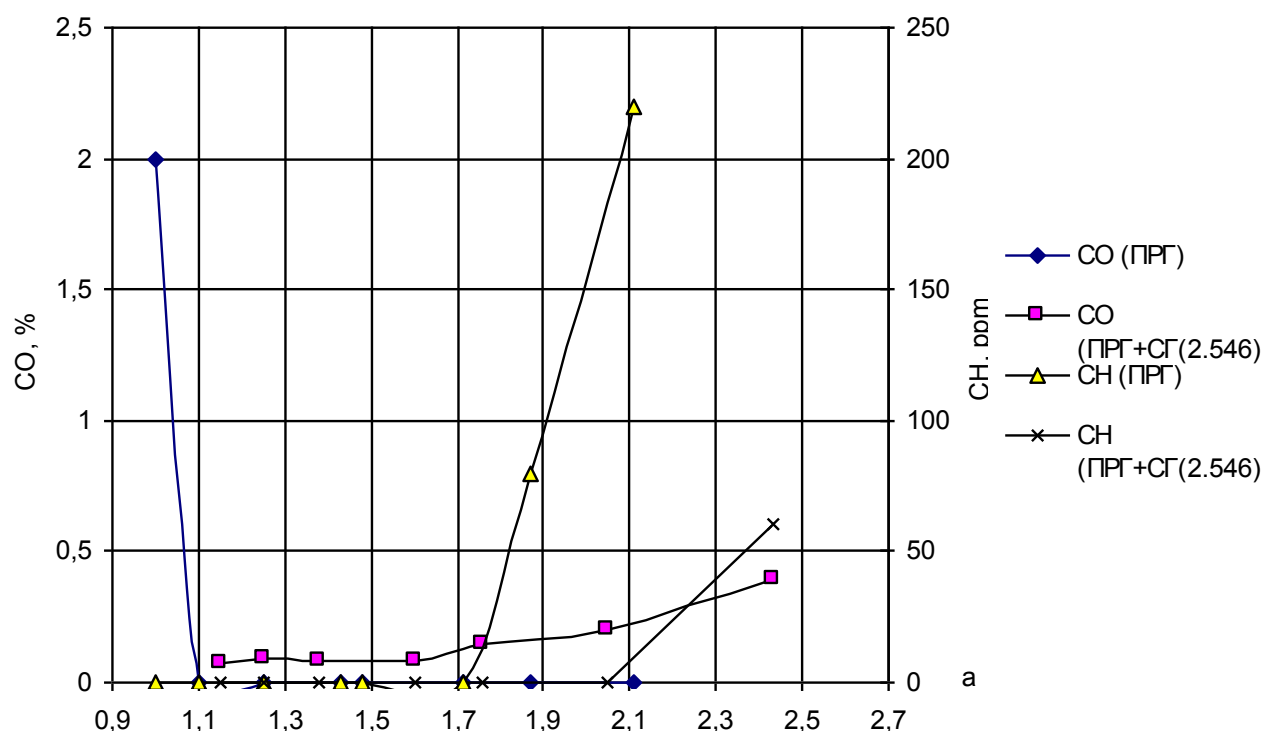


Рисунок 3.11 - Регулировочная характеристика $n = 3277 \text{ мин}^{-1}$, $P_e = 0,33 \text{ МПа}$

3.4 Общая характеристика выполненной работы и полученных результатов.

Как указывалось выше, цель данных исследований, состояла, в общей формулировке, в проведении испытаний системы ДВС-ГСГ, т.е. в получении результатов, отражающих сравнительные количественные характеристики, позволяющие сделать заключение об эффективности предлагаемого технического подхода. В результате работ был получен опыт управления двигателем с применяемой системой и, в частности, выявлены необходимость проведения дополнительных работ для обеспечения управления двигателем (тарировка газовых форсунок по бензиновым, необходимость наличия λ -зонда для работы данной системы, одного компьютера и записи необходимых коэффициентов в управляющую программу).

В свою очередь применённая система измерения расхода природного газа, базирующаяся на показаниях циклового расхода бензина контроллера “Январь 4.0”, потребовала проведения тарировки для получения зависимости

$G_{npz} = f(G_{\delta})$. Однако, при этом процесс измерений достаточно длителен и практически отсутствует возможность активной установки заданного режима работы двигателя.

После монтажа в боксе ГСГ потребовалось выполнение ряда согласованных работ для отладки функционирования системы в целом (тарировок и калибровок систем измерения расхода газа через двигатель и ГСГ, исправления имевших место неисправностей (отказ нормальнооткрытого ЭПК при длительной нагрузке) и проведение доработок (подбор манометров нужного диапазона и т.д.).

Безусловно, по данным причинам в сжатые сроки, отведённые для проведения работ, не были проведены достаточно полные испытания самого двигателя, который представляет собой единственный (уникальный) образец, т.е. надёжно не определены его базовые показатели, что тем более важно и актуально по причине комплектации его совершенно новой системой подачи сжатого газа.

Одной из задач работы с использованием топлива в смеси с СГ является практическая отработка и наращивание опыта для доработки ГСГ до автономного рабочего варианта, т.е. образца в котором сведены до минимума регулировочные установки при его работе с ДВС. При этом, безусловно, например, система питания ГСГ воздухом может на данном этапе испытаний являться стендовой, хотя в перспективе необходимо прогнозировать некоторую долю потерь эффективности ДВС на привод автономного воздушного компрессора.

В целом при проведении данных работ получены ряд результатов, которые не могли быть получены любым другим способом (лабораторными испытаниями ГСГ, при полной отработке ДВС и его ЭСУ) и которые необходимо учесть в дальнейших исследованиях. Например, факт существенного повышения выбросов СО во всех опытах, значительного повышения выбросов СН на режимах ХХ. Вероятной причиной здесь может быть наличие в СГ большого количества водяного пара. Точное установление

этого предположения может быть осуществлено экспериментально путём подачи во впускную трубу ДВС водяного пара. Вместе с тем возможны и другие, более сложные, явления (причины). например - влияние состава СГ .

Кроме того, во время испытаний было замечено сильное влияние пульсаций давления в магистрали форсунок двигателя на показания ротаметра (в сторону завышения). Поэтому в дальнейшем необходимо применение способа измерений, учитывающего наличие пульсационной составляющей, т.е. имеющего известное значение динамической погрешности (или известную амплитудно-частотную характеристику). Однако такого рода устройства разрабатываются и аттестуются конкретно для нужного случая. В частности, возможно применение термоанемометрического способа, однако при этом необходимо непрерывно интегрировать сигнал с датчика, т. к. при работе системы в составе ДВС необходимо знать мгновенные значения расхода ПГ через ГСГ.

В целом, данный вопрос, в связи с необходимостью измерения расхода ПГ в автономной системе, подлежит дополнительному специальному исследованию с конечной целью выбора средства управления работой ГСГ. Наиболее вероятным способом решения данного вопроса является разработка специализированного измерительного средства.

Опыт работ показал так же и необходимость модернизации системы измерения расхода воздуха через ГСГ, которая скомплектована на основе термоанемометрического датчика BOSCH с преобразователем ПРОТЕРМ. При этом тарировочная зависимость, т.е. зависимость действительного расхода воздуха от выходного напряжения такой системы, нелинейная, что затрудняет процесс установки нужного расхода, т.к. небольшое изменение показаний прибора приводят к большому изменению действительного расхода воздуха. Кроме того, в процессе испытаний выяснилось, что необходимы меньшие расходы, чем предусмотрены тарировкой (при работе двигателя на холостом ходу).

Несомненно полезен и полученный при испытаниях опыт работ по управлению собственно ГСГ. В частности уточнены режимы его регулирования по воздуху, сформулированы требования к необходимой измерительной аппаратуре (датчику и преобразователю), отмечена необходимость доработки системы пуска ГСГ (отказы пускового зажигания).

Повышения эффективности ГСГ можно достичь подогревом смеси перед подачей на катализатор. Это возможно осуществить рекуперацией тепла синтез газа на выходе из слоя (температура газа на выходе 600 - 650 °С) или от отработавших газов двигателя.. Следует отметить, что в испытываемой системе СГ перед подачей в двигатель охлаждается с использованием стороннего охладителя (проточной воды), что необходимо для получения требуемого наполнения цилиндров и является прямыми потерями энергии. Подогрев смеси теплом, отбираемым от СГ позволит избежать этих потерь. Кроме того, повышение температуры смеси на входе позволит уменьшить избыток воздуха, что приведет к увеличению выхода водорода.

Полученное при работе на малых расходах синтез газа (работа двигателя на холостом ходу) снижение конверсии с 90 % до 80 % и уменьшение выхода водорода с 30 % до 26 % в сухом газе также является следствием больших относительных потерь тепла.

3.5 Описание работы генератора синтез газа

3.5.1 Назначение и условия эксплуатации генератора синтез-газа

Генератор синтез-газа исполнен в стендовом варианте и предназначен для испытаний в комплексе с двигателем с целью определения снижения токсичных выбросов и повышения КПД двигателя. Схема генератора синтез-газа представлена на рисунке 1 приложения Б. В Генераторе синтез-газа осуществляется процесс воздушной каталитической конверсии природного газа или бензина в синтез-газ, который подается в систему питания двигателя.

3.5.2 Состав и назначение узлов, входящих в генератор синтез-газа

В состав генератора синтез-газа входят следующие основные узлы:

- Реактор синтез-газа, предназначен для воздушной каталитической конверсии природного газа или бензина в синтез-газ, схематично конструкция конвертора показана на рисунке Б2 данного приложения. Внутри корпуса конвертора для запуска имеется электрически разогреваемый каталитический блок, имеющий омическое сопротивление 0.3 Ом и питаемый от источника питания $U=13.8\text{В}$.
- Подогреватель воздуха поз. 4 рисунка Б1, предназначен для подогрева воздуха до температуры 250-330 °С. Нагрев воздуха осуществляется переменным напряжением, примерно 180 В (мощность 2 кВт), двумя параллельно установленными нагревателями общим омическим сопротивлением 52 Ом, потребляемый ток до 7А.
- Испаритель бензина поз. 5 рисунка Б1, предназначен для испарения бензина воздухом и получения гомогенной бензо-воздушной смеси, которая подается на конверсию.
- Электромагнитная форсунка поз. 6 рисунка Б1, предназначена для подачи и дозирования бензина в испаритель. Использована штатная форсунка с двигателя ВА3-2111. Рабочее давление топлива 300 ± 6 кПа, рабочее напряжение 12 ± 4 В, температура окружающего воздуха от – 40 °С до + 130 °С, максимальная температура корпуса форсунки 90 оС.
- Холодильник поз. 9 рисунка Б1, предназначен для охлаждения синтез-газа до температуры не более 70 оС.
- Вихревой нагнетатель воздуха поз. 17 рисунка Б1, предназначен для подачи атмосферного воздуха в ГСГ в количестве до 10 кг/час и давлении до 10 кПа изб.
- Блок управления генератором синтез-газа (БУГСГ), предназначен для управления электромагнитной форсункой и нагнетателем вихревого типа. БУГСГ обеспечивает задание величины расхода воздуха и автоматическое поддержание заданного соотношения воздух/топливо.

- Источник питания (70А) поз. 16 рисунка Б1, предназначен для работы пускового нагревателя конвертора, с выходным напряжением $U = 13.8\text{В}$ и потребляемым током до $I = 70\text{А}$.
- Манометр мод.11201 (1 кг/см²) поз. 18 рисунка Б1, предназначен для контроля давления воздуха на выходе из вихревого нагнетателя.

Оборудование объединено согласно рисунка Б1 комплектом и комплектом гибких трубопроводов в гидравлическую систему и смонтировано на специально изготовленной стойке.

В состав генератора синтез-газа входит система газового анализа синтез-газа на водород и оксид углерода, включающая газоанализатора ГИАМ-14, газоанализатор АГ-12, прокачной насос с производительностью 1 л/мин. с линией сброса в атмосферу проанализированного потока.

Технологический контроль за процессом получения синтез-газа и состоянием оборудования осуществляется 9-ю хромель-алюмелевыми термопарами, которые установлены в стенде согласно таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Перечень и назначение термопар контроля состояния ГСГ

№ п.п.	Место установки термопары	Обозначение термопары
1	Испаритель бензина - штуцер выхода нагретого воздуха	T1
2	Испаритель бензина – тыльная часть насыпного гранулированного испарителя	T2
3	Конвертор - зона перед входом в рассекатель потока	T3
4	Конвертор - зона за рассекателем потока – лобовой слой	T4
5	Конвертор - зона перед пускателем	T5
6	Конвертор - зона за пускателем	T6
7	Конвертор – зона между фехрелевыми блоками	T7

8	Конвертор – зона за катализаторами, выход из конвертора	T8
9	Испаритель бензина – у фланца крепления форсунки	T9

3.5.3 Работа генератора синтез-газа на бензине

При работе на бензине генератор синтез-газа запускать и работать с предварительным нагревом воздуха. Подача воздуха может осуществляться как от вихревого нагнетателя поз.17, так и от внешнего источника сжатого воздуха. В случае использования нагнетателя подача и регулировка расхода воздуха осуществляется с пульта управления БУГСГ. Измерение расхода осуществляется датчиком расхода воздуха поз.3. В случае подачи воздуха от внешнего источника измерение расхода осуществляется как датчиком расхода воздуха, так дополнительно и другим расходомером. Подключение внешнего источника подачи воздуха производить взамен вихревого нагнетателя к штуцеру подачи воздуха поз.1.

Контроль текущего расхода воздуха осуществляется с помощью просмотра переменной Y0 блока С регулятора «ПРОТЕРМ 100», а фактический расход воздуха (для установленного чувствительного элемента HFM5-classic) может определяется по графику см. рисунок Б 4.

Поддержание заданного соотношения воздух/бензин осуществляется БУГСГ автоматически. Расход бензина зависит от частоты работы форсунки, см. тарировочный график на рис.3. Контроль частоты работы форсунки может осуществляться с помощью внешнего частотомера. Массовое отношение воздух/бензин должно быть больше 4.95 (что соответствует отношению O₂/C больше 0.5, для бензина).

Порядок проведения работ:

Произвести подготовку к работе генератора синтез-газа при работе с бензином:

1 Проверить исправность электрических нагревателей, в т.ч. пусковой нагреватель конвертора и нагреватель подогревателя воздуха и питающих

электрических сетей всех устройств. Проверку исправности электрических нагревателей производить замером омического сопротивления и проверкой их нагрева при подаче напряжения.

2 Проверить исправность термопар.

3 Подключить шины защитного заземления всех электрических устройств и стойки крепления генератора синтез-газа.

4 Установить линию сброса синтез-газа в атмосферу.

5 Проверить герметичность всех стыковочных элементов трубопроводов, при этом заглушить штуцер подачи метана на испарителе.

6 Провести тарировку датчика расхода воздуха и форсунки, в случае замены форсунки и чувствительного элемента в датчике расхода воздуха.

7 Прогреть газоанализаторы ГИАМ-14 и АГ-12 в течение не менее 40 минут.

8 Проверить исправность манометров контроля давления воздуха на выходе из вихревого нагнетателя и контроля давления бензина.

9 Проверить наличие средств пожаротушения при работе с бензином.

10 Кран поз.10 закрыть, краны поз. 12 и 13 открыть (см. рисунок1).

2 Подать напряжение на нагреватель подогревателя воздуха поз.4 рис.1.

3 Подать воздух с расходом 2.0-5.0 м³/час, и прогревать испаритель бензина до температур 250-300 °С на входе воздуха в испаритель и на выходе испарителя до температуры 150-200 °С. Это достигается путем изменения расхода воздуха и мощности нагревателя. Показания снимать по термопарам Т1 и Т2.

4 Снизить расход воздуха до 1.0-1.5 м³/час.

5 Включить пусковой нагреватель реактора поз.16 рисунка Б1.

6 Подать бензин включением тумблера «Форсунка» БУГСГ, «, при этом давление бензина на входе в форсунку должно иметь заданную величину.

7 Контролировать температуру в реакторе, контроль вести по термопарам поз.13-18 рисунок Б1.

8 Отключить подачу напряжения на нагреватель реактора при достижении на одной из термопар температуры 600-650 °С.

9 При выходе температур в реакторе на стационарный режим осуществить установку необходимого режима ступенчатым увеличением расхода воздуха. Разовые изменения не более 15% от предыдущего расхода.

10 При выходе температур в реакторе на стационарный режим при заданном расходе, переключить подачу синтез-газа в двигатель: вентиль поз.10 открыть, вентиль поз.12 закрыть. За стационарный режим принимать тепловой режим реактора, когда последующие температуры в реакторе отличаются от предыдущих не более чем на 5 °С в течение 30-х сек.

11 При запуске реактора выходящий из генератора синтез-газа газ сбрасывать в атмосферу, при этом должен быть открыт кран сброса синтез-газа в атмосферу поз.12 рисунок 1 и закрыт кран 10.

12 При работе генератора на заданном режиме, с целью получения максимальной концентрации водорода из генератора синтез-газа, можно варьировать концентрацию бензина в пределах 0.8-1.2 от установленного ранее. При этом температура в любой точке реактора не должна превышать 1200 °С. Изменение соотношения расходов воздух/бензин осуществляется ПРОТЕРМОМ.

13 Останов реактора осуществлять, отключив подачу воздуха – снять напряжение питания с вихревого нагнетателя тумблером БУГСГ, отключение подачи бензина произойдет автоматически.

14 Выключить тумблер «Форсунка» БУГСГ.

15 Отключить в течение не более 5 сек. нагреватель подогревателя воздуха.

16 Закрыть краны 10, 12, 13, для исключения попадания воздуха из атмосферы на раскаленный катализатор.

17 Подавать воздух в ректор допускается после охлаждения реактора до температур не более 400 °С.

18 При работе от внешнего источника подачи воздуха станов реактора осуществлять закрытием крана поз.13 с последующим в течение не более 1-3 сек. выключением подачи бензина (Выключить тумблер «Форсунка» БУГСГ).

Работа генератора синтез-газа на природном газе

При работе на природном газе ГСГ может запускаться и работать без предварительного нагрева воздуха. Подача воздуха может осуществляться как от вихревого нагнетателя, так и от внешнего источника сжатого воздуха. В случае использования нагнетателя регулировка расхода воздуха осуществляется с пульта управления БУГСГ. Измерение расхода осуществляется датчиком расхода воздуха. В случае подачи воздуха от внешнего источника измерение расхода осуществляется как датчиком расхода воздуха, так и другим расходомером, точностью не грубее 5%.

Регулировка и измерение расхода природного газа может осуществляться контроллером (массфлоу) типа «MKS» или регулировочным устройством и расходомером. Массовое отношение воздух/бензин должно быть больше 4.95 (что соответствует отношению O_2/C больше 0.5, для бензина).

Порядок проведения работ:

Произвести подготовку к работе генератора синтез-газа при работе с природным газом:

- 1 Подключить природный газ к штуцеру подачи природного газа на испарителе бензина, при этом установив регулятор расхода природного газа. Контроль и задание расхода природного газа может осуществляться контроллером (массфлоу) типа «MKS» или регулировочным устройством и расходомером.
- 2 Проверить исправность электрических нагревателей, в т.ч. пусковой нагреватель конвертора и нагреватель подогревателя воздуха и питающих электрических сетей всех устройств.
- 3 Проверить исправность термопар.
- 4 Подключить шины защитного заземления всех электрических устройств и стойки крепления генератора синтез-газа.

- 5 Проверить подключение генератора синтез-газа к стационарной линией сброса газов выходящих из генератора синтез-газа в атмосферу.
- 6 Проверить герметичность всех стыковочных элементов трубопроводов, при этом заглушить штуцер подачи метана на испарителе.
- 7 Провести тарировку датчика расхода воздуха, в случае замены чувствительного элемента.
- 8 Прогреть газоанализаторы ГИАМ-14 и АГ-12 в течение не менее 40 минут.
- 9 Проверить исправность манометров контроля давления воздуха на выходе из вихревого нагнетателя и контроля давления природного газа.
- 10 Проверить наличие средств пожаротушения при работе с природным газом.
- 11 Кран поз.10 закрыть, краны поз. 12 и 13 открыть (см. рисунок Б1).
- 12 Подать воздух с расходом 1.0-1.5 м³/час.
- 13 Включается пусковой нагреватель конвертора («пускач»), при достижении температуры на термопаре Т6 (после пускателя) 390-430 °С, подавать природный газ из расчета 25-27% объемной концентрации метана в топливовоздушной смеси (отношение O^2/C в смеси равно от 0.51 до 0.53). После начала реакции и достижения температуры (на любой из термопар Т3-Т7) 600-650 °С отключить подачу напряжения на нагреватель. В момент запуска и выхода на режим растёт давление в реакторе, вследствие этого меняется (уменьшается) расход воздуха(при работе с нагнетателем), поэтому необходимо удерживать расход воздуха путем регулирования работы вихревого нагнетателя с пульта БУГСГ или ручным вентилем.
- 14 При выходе температур в реакторе на стационарный режим осуществить установку необходимого режима ступенчатым увеличением расхода сначала природного газа, а затем воздуха. Разовые изменения не более 15% от предыдущего расхода.
- 15 При выходе температур в реакторе на стационарный режим при заданном расходе, переключить подачу синтез-газа в двигатель: вентиль поз.10 открыть, вентиль поз.12 закрыть.

- 16 При запуске выходящий из генератора газ сжигать на горелочном устройстве.
- 17 При работе генератора на заданном режиме, с целью получения максимальной концентрации водорода из генератора, можно варьировать концентрацию природного газа в исходной смеси в пределах 29-20 %, изменением расходов газов. При этом температура в любой точке реактора не должна превышать 1150 °С.
- 18 Переход на больший расход осуществлять по п. 3.1.4., а на меньший расход, сначала ступенчато уменьшать расход воздуха, а затем – природного газа до нужного расхода. Разовые изменения не более 15% от предыдущего расхода.
- 19 Останов реактора осуществлять, отключив подачу воздуха – снять напряжение питания с вихревого нагнетателя тумблером БУГСГ, затем произвести отключение подачи природного газа.
- 20 Закрывать краны 10, 12, 13, для исключения попадания воздуха из атмосферы на раскаленный катализатор.
- 21 Подавать воздух в реактор допускается после охлаждения реактора до температур не более 400 °С.
- 22 При работе от внешнего источника подачи воздуха станов реактора осуществлять закрытием крана поз.13 с последующим в течение не более 1-3 сек. выключением подачи природного газа.

3.5.4 Химический анализ состава синтез-газа

Химический анализ состава синтез-газа производится проточными газоанализаторами водорода АГ-12 и оксида углерода ГИАМ-14. Проток синтез-газа через газоанализаторы, производится воздушным насосом с производительностью 1 л/мин. Анализируемый синтез-газ на входе в газоанализаторы должен быть осушенным и очищенным от посторонних включений, и иметь температуру не выше 20 °С. Для этого применяется стойка для подготовки синтез-газа для газового анализа состоящей из холодильника

Х 300, фильтров грубой очистки и тонкой очистки. Сброс синтез-газа после газового анализа производить в линии сброса отходящего потока в атмосферу.

3.5.5 Характерные неисправности генератора синтез-газа и методы их устранения

В процессе эксплуатации генератора синтез-газа возможны следующие неисправности:

1. Выход из работоспособного состояния форсунки дозирования бензина. Возможные неисправности: разрушения уплотняющих резиновых колец и разрушение электрических проводов и обмоток электромагнита. В случае разрушения уплотняющих резиновых колец произвести их замену. В случае разрушения электрических проводов и обмоток электромагнита произвести замену форсунки, после установки новой форсунки построить калибровочный график расхода бензина от частоты работы форсунки, см. рисунок Б3.
2. Выход из работоспособного состояния чувствительного элемента датчика расхода воздуха. В этом случае произвести его замену с последующей тарировкой расхода воздуха от частоты вращения нагнетателя, см. рисунок Б4.
3. Разрушение электрических нагревателей подогревателя воздуха, произвести переборку устройства с заменой электрических нагревателей.
4. Разрушение пускового нагревателя конвертора и потеря каталитической активности каталитических блоков характеризуется низким качеством синтез-газа или вообще отсутствием процесса воздушной конверсии, что можно видеть по низким температурам в конверторе. Данная неисправность устраняется заменой входящих в конвертор узлов сотрудниками ИК СО РАН.

3.5.6 Особые условия эксплуатации генератора синтез-газа

1. Машинный бокс, в котором устанавливается генератор синтез-газа, должен быть оборудован стационарной линией сброса газов выходящих из генератора синтез-газа в атмосферу. Выбрасываемые в атмосферу газы должны быть разбавлены большим количеством воздуха или их можно сжигать на горелочном устройстве, предусмотрев дополнительный дежурный факел для поджига горелочного устройства.
2. Стойку генератор синтез-газа устанавливать на подставке, позволяющей закрепить вихревой нагнетатель и успокоитель потока.
3. Подключить шины защитного заземления всех электрических устройств и стойки крепления генератора синтез-газа к контуру заземления машинного бокса.
4. Блок управления ГСГ, газоанализаторы и другие приборы системы управления и контроля установить на местах, обеспечивающих их удобное обслуживание и работу с ними.
5. Машинный бокс оборудовать системой газового анализа синтез-газа на водород и оксид углерода, см. рис.3. предусмотрев выброс проходящего анализ газа в атмосферу.
6. Генератор синтез-газа допускает аварийный останов двигателя.

4 Схема силовой установки ГГПСУ

Принципиальная схема силовой установки реализуемой принцип добавки синтез-газа представлена на рисунке 4.1

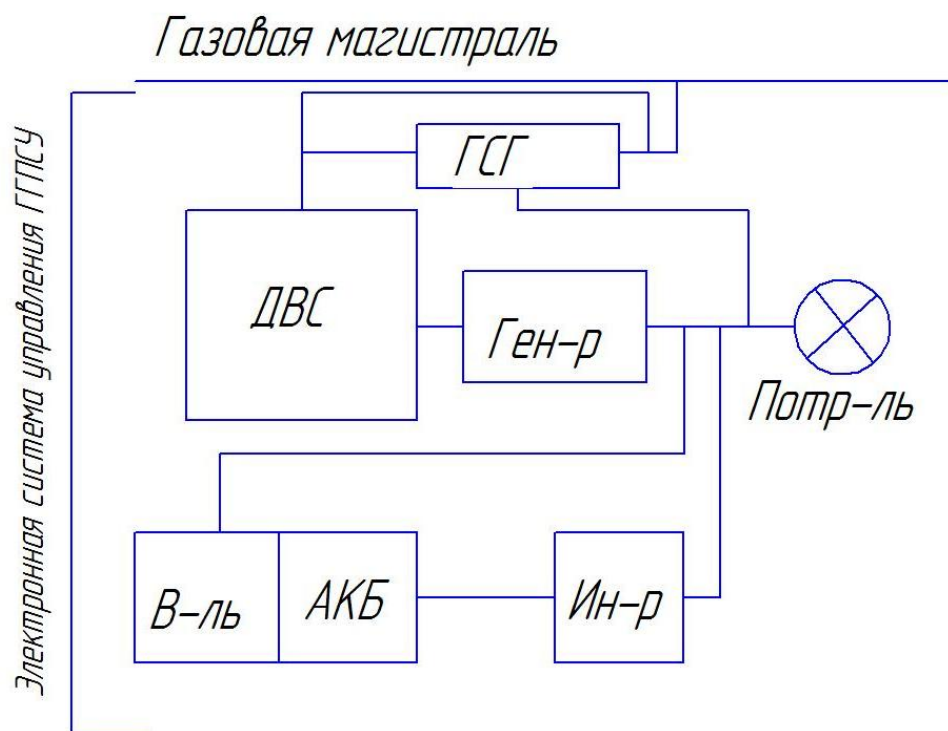


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема модернизированной ГГПСУ

На рисунке 4.1 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.

Установка работает следующим образом. Выделяют три базовых режима работы ГГПСУ:

- первый 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.

- второй 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, также, зарядка аккумуляторных батарей установки. Двигатель внутреннего сгорания при этом работает с добавкой синтез-газа к основному топливу.

- третий 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 значительного обеднения рабочей смеси обеспечить лучшие, по сравнению с базовыми показателями (см рисунок 2.1), параметры по экологичности и экономичности.

Заключение

По результатам выполненной работы можно сформулировать следующие выводы:

1 Проведен анализ существующих схем гибридных установок, и установлены направления совершенствования их конструкции.

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

3 Предложена схема гибридной установки реализующий принцип использования синтез-газа.

4 Установлены отдельные особенности применения синтез-газа в двигателе гибридной установки. В частности, анализ результатов испытаний проведенных ранее в ТГУ показывает:

- при работе на смеси ПГ и СГ эффективность рабочего процесса ДВС, определённая по подведённой с топливом теплоте, при добавках СГ к метану повышается на 5- 7%;
- при работе на смеси ПГ и СГ общий экономический эффект по расходу топлива при применении данной конструкции ГСГ для поршневого ДВС на нагрузочных режимах на отдельных режимах увеличивается;
- применение синтез газа позволяет обеспечить работу двигателя со степенью сжатия 12,0 на топливных смесях, обедненных до $\lambda = 2,5$ при существенном снижении объёмного содержания NO_x – до следов.

Список использованных источников

1. Золотницкий В.А. Новые газовые системы автомобилей. – М.: «Издательский дом Третий Рим», 2003.
2. Лютко В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: МАДИ, 2000 – 2 т.
3. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. Изд. 2-е – перераб. – М.: Машиностроение. – 1981.
4. Хитрин Л.И. Физика горения и взрыва / Л.И. Хитрин; М.: - 1955.
5. Асмус Т.У. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т.У. Асмус, К. Бргннакке и др.; под ред. Д.Хиллиарада, Дж.С. Спрингера; перевод с англ. Васильева; под ред. А.В. Кострова. – М.: Машиностроение, 1988.
6. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени; перевод с англ. Ю.Ф. Дитикина. – Машиностроение. – 1981.
7. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. Изд. 2-е - перераб. и доп. – М.: Высш. Школа. – 1980.
8. Wentworth J.T. SAE. Combust., Sci. Technol., 4, 970100. – 1970.
9. Simon D.M. Fourth Symposium (International) on combustion / Simon D.M., Belles F.E., Spakowski A.E.; p. 126-138, Baltimore. - 1953. См. 4-ый симпозиум (международный) по вопросам горения и детонационных волн: оборонгаз с. 100. – 1958.
10. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов / Я.Б. Зельдович; М.: АН СССР. – 1954.
11. Золотницкий В.А. Новые газовые системы автомобилей. – М.: «Издательский дом Третий Рим», 2003.
12. The Clean Fuels Report, J.E. Sinor Consultants Inc., Niwot, Colorado, June 1992.

13. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие / А.Р. Кульчицкий; Владимирский гос. университет. Владимир, 2000.
14. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени; перевод с англ. Ю.Ф. Дитикина. – Машиностроение. – 1981.
15. Основы горения углеводородных топлив; перевод с англ. под ред. Л.И. Хитрина и А.И. Попова. – Изд. иностр. литературы. – 1960.
16. Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Book Company, 1994.
17. Эйдинов А.А. Электромобили. Учебное пособие. – М.: МАМИ, 1997, с. 80.
18. Лидоренко Н.С., Мучник Г.Ф., Бортников Ю.С., Иванов А.М., Постановов В.П. Электромобили. – М.: ВНИИЦентр, 1984.
19. Ставров О.А. Электромобили. – М.: ВИНТинформации, 1976.
20. Эйдинов А.А. Развитие систем автомобильной электротехники. – М.: НАМИ, 1995.
21. Эйдинов А.А., Дижур М.М. Направления развития тяговых источников тока для электромобилей. – М.: НИИНавтопром, 1985, с.46.
22. Электромобиль: техника и экономика. Щетина В.А., Морговский Ю.А., Центе Б.И., Богомазов В.А. Под общ. ред. Щетины В.А. –Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987, с. 253.
23. Накопители энергии. Бут Д.А., Алиевский Б.П., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. – М.: Энергоатомиздат, 1991, с.400.
24. Афанасьев А.М., Михайленко И.Е., Стригущенко И.В. Электролитический конденсатор двойного слоя // Электротехнические системы транспортных средств и их роботизированных производств / Тез. докл. научн. техн. конф. секция «Автомобильная электротехника и электроника». – М.: НПО «Автоэлектроника», 1995, с.60.

25. Быстрозарядные тяговые и стартерные батареи сверхемких конденсаторов. Новые экологически чистые источники энергии. Проспект фирмы ЭСМА. – Москва, 1996.
26. Арсеньев О.В., Корзуков Н.И. Комбинированный источник тока (аккумуляторная батарея и накопитель энергии) для легковых автомобилей // Электротехнические системы транспортных средств и их роботизированных производств / Тез. докл. научн. техн. конф. секция «Автомобильная электротехника и электроника». – М.: НПО «Автоэлектроника», 1995, с.67.
27. Исследование тяговых систем автотранспортных средств с бортовыми источниками энергии различной физической природы. Отчет ОНИР // Петленко Б.И., Листвинский М.С. и др. / - М.: МАМИ, 1993, №5 г.р. 114900.
28. Гурьянов Д.И., Дижур М.М. и др., Экспериментальные исследования бортовых источников энергии различной физической природы // Электромеханические системы с компьютерным управлением на автотранспортных средствах и в их роботизированном производстве / Сб. научн. тр. – М.: МАМИ, 1994, с.56-62.
29. Дижур М.М., Эйдинов А.А., Расчетные исследования возможностей тяговых источников тока для электромобилей. // Совершенствование технико-экономических показателей автомобильной техники / Сб. научн. тр. – М.: НАМИ 1996, с. 50-58.
30. Гурьянов Д.И., Воротников П.В., Петленко А.Б., Фомин А.В. К построению тяговых систем электромобилей // Развитие автомобильной электроники и электрооборудования / Материалы четвертого симпозиума – М.: НИИАЭ 1993, с. 81-82.
31. Докучаев С.В., Луганский К.П., Петленко А.Б., Тауфик Аль-Масуд, Тенденции развития напольного внутрицехового транспорта // Электротехнические системы транспортных средств и их роботизированных производств / Сб. научн. тр. – М.: МАМИ 1995, с.

32. N.N. Mustafi, Y.C. Miraglia, R.R. Raine, P.K. Bansal, S.T. Elder, Spark-ignition engine performance with 'Powergas' fuel (mixture of CO/H₂): A comparison with gasoline and natural gas. *Fuel*, V. 85, p. 1605-1612, 2006
33. D. Andreatta, R.W. Dibble, An experimental study of air-reformed natural gas in spark-ignited engines. SAE Technical Paper Series No. 960852, 1996
34. C. Sogaard, J. Schramm, T.K. Jensen, Reduction of UHC-emissions from natural gas fired SI-engine – production and application of steam reforming natural gas. SAE Technical Paper Series No. 2000-01-2823, 2000
35. J.E. Kirwan, A.A. Quader, M.J. Grieve, Advanced engine management using on-board gasoline partial oxidation reforming for meeting super-ULEV (SULEV) emissions standards. SAE Technical Paper Series No. 1999-01-2927, 1999
36. M.A.S. Al-Baghdadi, Hydrogen-ethanol blending as an alternative fuel of spark ignition engines. *Renewable Energy*, V. 28, p. 1471-1478, 2003
37. Пионтковская С.А., Повышение энергоэффективности тяговой системы внутризаводского электротранспорта с комбинированной энергоустановкой: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03 / Пионтковская Светлана Артуровна. Москва, 2005.

Приложение А

(Обязательное)

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

п, об/мин	Ре, МПа	Gв, кг/ч	Gнрг, м³/ч	Q, МДж/ч	УОЗ	□meta	□nsk	МЕТА					ГА			
								О2, %	СО, %	СН, ppm	NOx, ppm	СО2, %	О2, %	СО, %	NOx, ppm	СО2,%
850	0	7,7	0,852	30,513	25	1,04	1,05	1,67	1,27	150	140	12				
		7,6	0,724	25,909	32	1,2	1,19	3,55	0,22	130	260	11,4				
		8,3	0,690	24,712	32	1,315	1,32	5,27	0,22	80	140	10,7				
		9,2	0,679	24,298	32	1,44	1,48	6,55	0,19	120	70	9,77				
		10,4	0,698	24,989	32	1,61	1,73	8,57	0,19	140	40	8,78				
		10,6	0,739	26,462	32	1,59		8,43	0,26	230	50	9,15				
1380	0	13,1	1,348	48,259	33	1,09	1,07	1,78	0,37	0	530	11,2	1,3	0,41	410	12
		17,1	1,212	43,401	35	1,49	1,49	6,67	0,14	100	170	8,96	6,8	0,04	97	7,8
		19,2	1,212	43,401	38	1,67	1,69	8,19	0,15	230	70	7,85	8,6	0,06	30	6,9
		21,2	1,285	46,017	42	1,90	1,97	9,83	0,16	320	60	6,93	10,3	0,06	19	5,9
2185	0.19	32	3,920	140,322	32	0,98	1,01	2,4	3,88	70	430	10,2	0,2		226	11,5
		32,3	3,292	117,837	32	1,05	1,01	2	1,26	20	1380	12,2	0,2		1283	11,6
		34,4	3,093	110,737	30	1,19	1,13	3,45	0,27	0	1780	11,7	2,4		1789	10,4
		37,2	2,968	106,240	32	1,31	1,26	5,08	0,26	10	1410	10,8	4,3		1350	9,3
		39,5	2,885	103,282	35	1,42	1,40	6,53	0,26	0	930	10,2	6		804	8,3
		43,2	2,855	102,216	40	1,55	1,56	7,85	0,25	20	570	9,36	7,5	0,29	465	7,6
		46,2	2,796	100,086	47	1,64	1,73	8,9	0,23	70	430	9,01	8,8		320	6,8
		50	2,825	101,151	52	1,78	1,94	9,94	0,29	180	240	8,32	10	0,17	161	6
2185	0.2	57,4	2,978	106,595	52	1,97	2,27	11,4	0,3	330	120	7,31	11,8	0,17	57	5,2
		34	3,434	122,926	27	1,14	1,05	2,1	0,11	70	1380	10,2	1,2	0,19	1305	11
		39,3	3,100	110,974	38	1,41	1,33	5,41	0,06	60	1690	8,93	5,2	0,05	1646	8,8
		45	2,994	107,187	38	1,73	1,62	8,1	0,07	140	320	7,46	8	0,06	233	7,2
3277	0.33	53	3,044	108,962	50	2,06	1,99	10,2	0,06	260	150	6,24	10,4	0,07	96	5,9
		62,8	7,102	254,245	30	1,00	1,01	1,27	2	0	1340	9,92	0,6		1336	11,5
		67,3	6,497	232,592	27	1,16	1,07	2,32	0	0	2180	10,4	1,4		2260	10,9
		71	6,175	221,055	35	1,29	1,20	3,96	0	0	2870	9,62	3,5		3021	9,7
		77	5,952	213,069	38	1,43	1,32	5,51	0	0	2200	8,82	5,1		2184	8,8
		81,6	5,852	209,519	38	1,60	1,48	7,12	0	0	960	8,08	6,8		779	7,9
		92	5,743	205,614	55	1,83	1,71	8,79	0	0	670	7,29	8,7		563	6,9
		100	5,803	207,744	55	1,98	1,87	9,89	0	80	330	6,84	9,8	0,05	232	6,2
3277	0.33	110	6,200	221,943	55	2,31	2,11	11,3	0	220	200	5,72	11,2		117	5,5

Продолжение приложения А

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

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

Продолжение приложения А

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

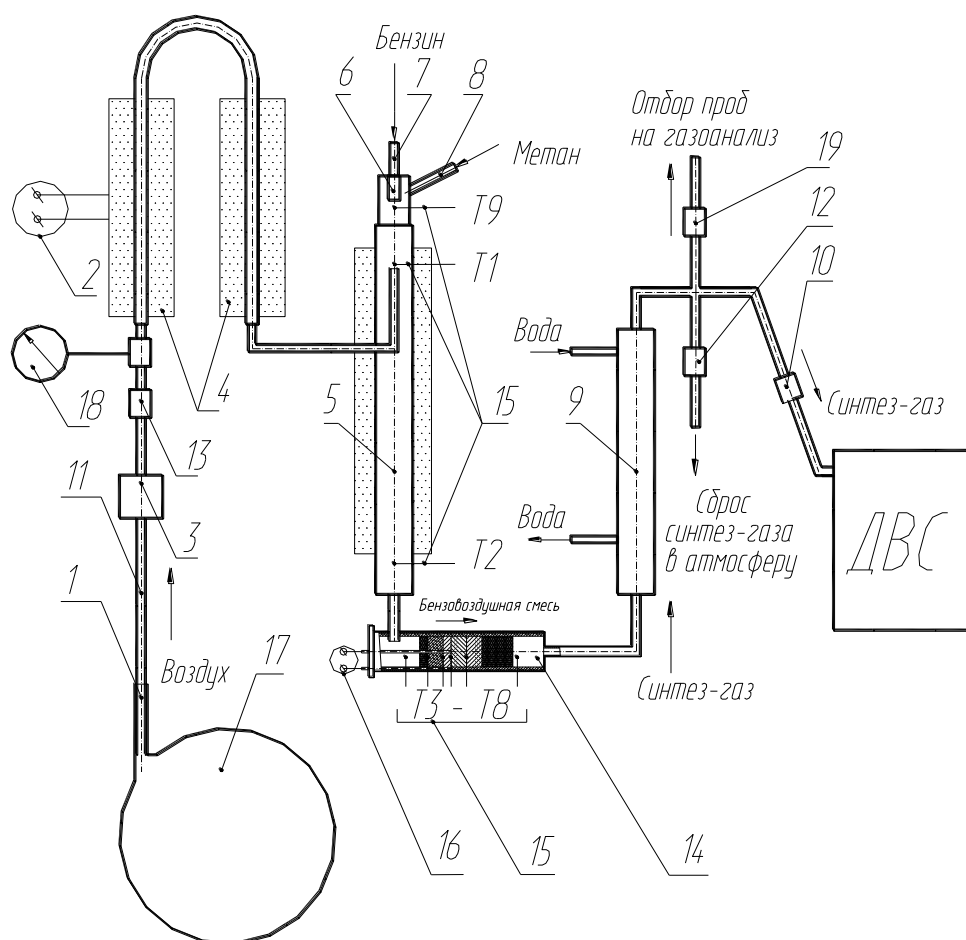
n, об/мин	Pe, МПа	Gв, кг/ч	G _{прг} ГСГ, м ³ /ч	Qsigma, МДж/ч	УОЗ	λ _{meta}	λ _{nsk}	МЕТА					ГА			
								O2, %	CO, %	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	O2, %	CO, %	NOx, ppm	CO2,%
850	0	5,3	0,9706	34,747	25	1,04		1,14	0,65	170	40	10,5				
		5,2	0,935	33,473	25	1,04	1,03	1,28	0,67	290	50	10,8				
		7,6	0,865	30,967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

Продолжение приложения А

Таблица 4 - Параметры работы ГСГ

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

Приложение Б (обязательное)



- | | |
|---|---|
| 1. Штуцер подачи воздуха | 11. Успокоитель потока |
| 2. Источник питания нагревателя воздуха | 12. Кран сброса синтез-газа в атмосферу |
| 3. Датчик расхода воздуха | 13. Кран подачи воздуха в подогреватель воздуха |
| 4. Подогреватель воздуха | 14. Конвертор синтез-газа |
| 5. Испаритель бензина | 15. Термопары |
| 6. Электромагнитная форсунка | 16. Источник питания пускового нагревателя |
| 7. Штуцер подачи бензина | 17. Вихревой нагнетатель воздуха |
| 8. Штуцер подачи метана | 18. Манометр, для контроля давления воздуха на выходе из вихревого нагнетателя. |
| 9. Холодильник | 19. Кран отбора синтез-газа в газоанализаторы |
| 10. Кран подачи синтез-газа в ДВС | |

Рисунок Б1 – Схема системы подачи синтез-газа

Продолжение приложения Б

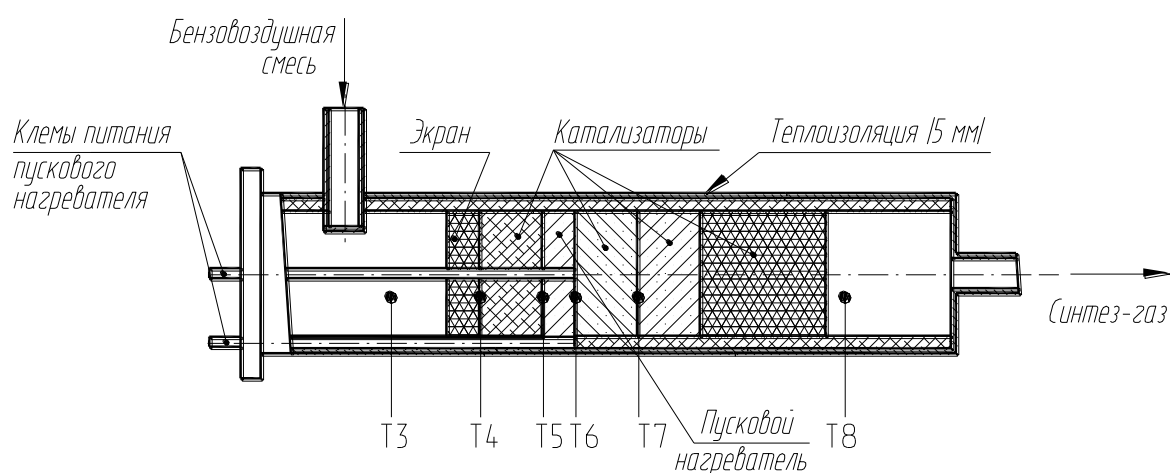


Рисунок Б2 – Устройство каталитического блока генератора синтез-газа

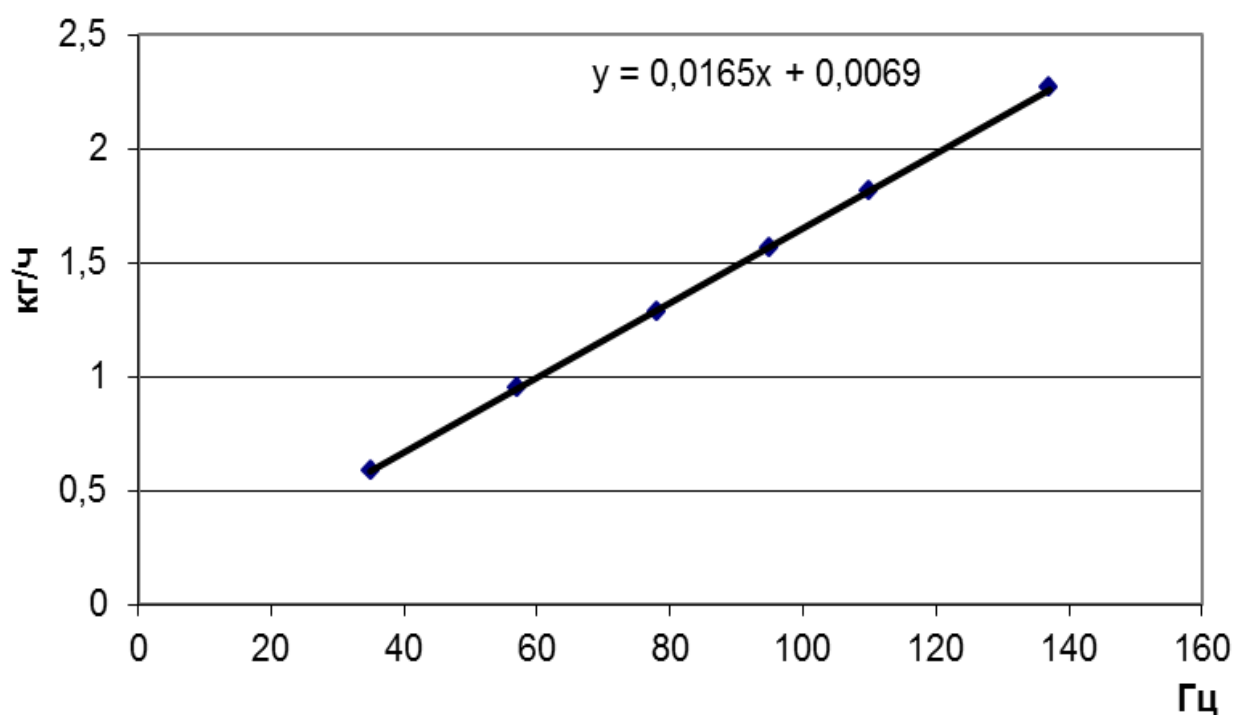


Рисунок Б3 - Тарировочная зависимость расхода бензина от частоты работы форсунки, при коэффициенте блока $\eta_{с2}=1$ «ПРОТЕРМА 100»

Продолжение приложения Б

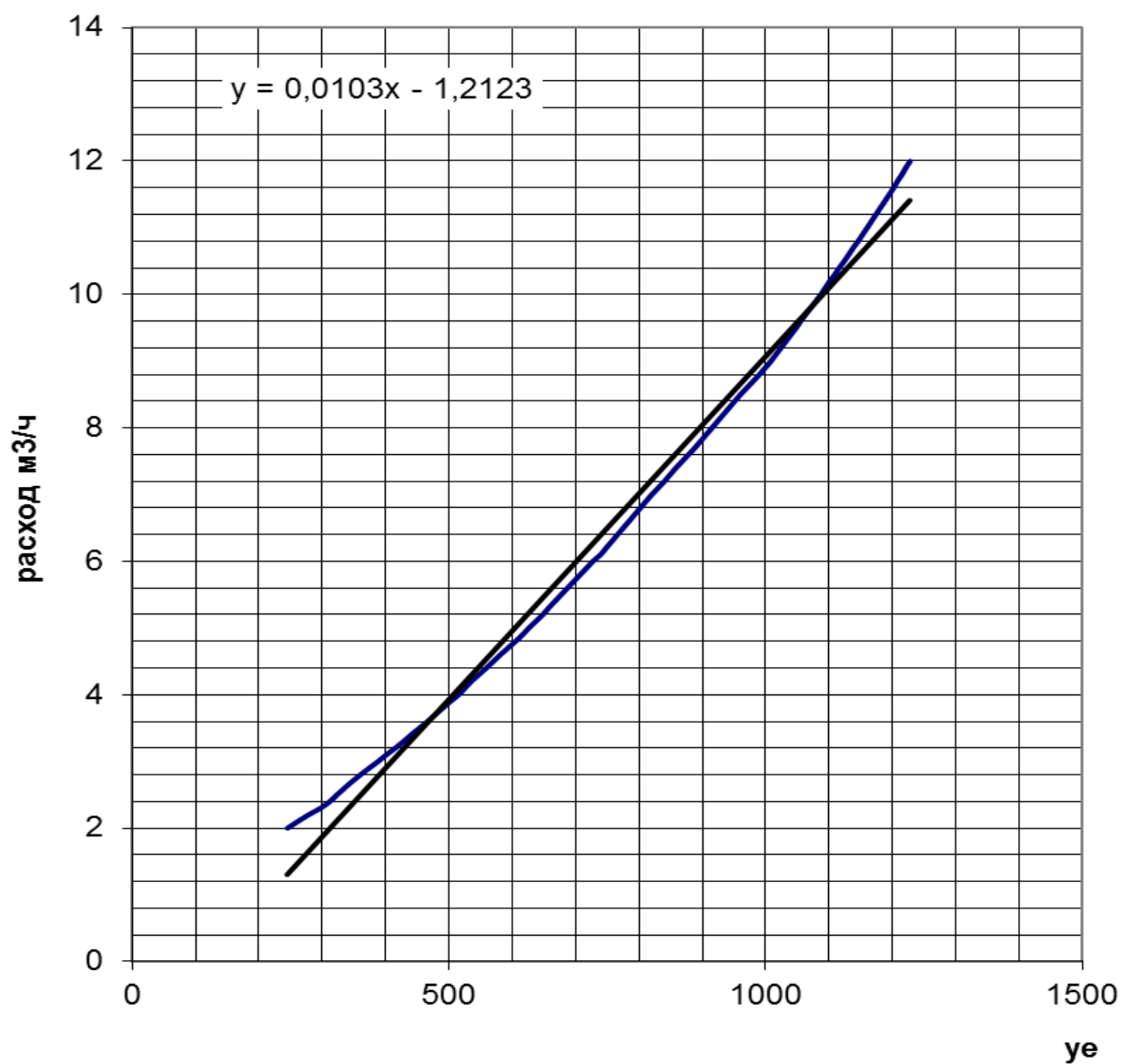


Рисунок Б4 – Зависимость расхода воздуха от переменной ПРОТЕРМ 100

Приложение В (справочное)

МЕТОДИКА

испытаний опытного образца генератора синтез-газа в составе ДВС на моторном стенде

В настоящее время проводятся исследования по выявлению возможных способов повышения эффективности рабочего процесса ДВС, целью которых является снижение выбросов двуокиси углерода (CO_2). Одним из наиболее эффективных из них представляется применение альтернативных топлив, таких как водород и водородосодержащие газы, в частности, природный или синтетический газы.

В СО РАН Институтом катализа разработан генератор синтез газа (СГ), имеющий показатели, удовлетворяющие возможности его применения на автомобильном транспорте. При этом работа ДВС осуществляется на смеси основного топлива (бензина или сжатого газа) с добавками, получаемого из разложения основного топлива, синтез газа с повышенным содержанием водорода. В конечном результате при таком способе снижаются выбросы всех токсичных компонентов отработавших газов (ОГ), включая и CO_2 .

1 Цель испытаний.

Целью испытаний является исследование в условиях моторного стенда режимов работы генератора синтез газа, работающего в варианте воздушной конверсии природного газа. При этом, в процессе подготовки и проведения испытаний выполняются следующие работы:

- моторный бокс (стенд) оборудуется системами подачи природного газа, генератором СГ и средствами обеспечения его функционирования, включая средства измерений и управления;

- подготавливается двигатель типа ВАЗ для работы на сжатом газе, ориентированный на получение наиболее эффективных показателей (мощностных, экономических и токсических);
- проводятся пуско-наладочные работы в боксе генератора СГ и испытания системы в составе ДВС-генератор СГ;
- проводится анализ результатов работ.

2 Объект испытаний.

Объектами испытаний является генератор СГ, реализующий принцип воздушной паровой конверсии природного газа и поршневой ДВС, конвертированный для работы на природном газе.

Конструкция, принцип работы, условия функционирования данного генератора разработаны ИК СО РАН, который производит его изготовление и поставку на испытания в ТГУ.

Генератор поставляется в комплекте, обеспечивающем его работоспособность в течение срока испытаний в моторном боксе, и включает: каталитический блок, систему измерения воздуха и регулирования расхода метана, систему (элементы) управления работой генератора с необходимыми для обеспечения функционирования генератора датчиками и устройствами (термопарами, манометрами и т.д.), соединительную арматуру.

Испытуемый ДВС представляет собой 4х тактный, 4х цилиндровый двигатель рабочим объёмом $V_h = 1,6$ л. с искровым зажиганием и электронной системой управления. Степень сжатия двигателя оптимизирована для работы на сжатом природном газе и составляет величину $\varepsilon = 12$. Двигатель оборудован системой для работы на сжатом природном газе, включающей редукторы высокого и низкого давлений, газовую рампу и форсунки, контроллер с базовой программой (калибровками) работы на газе и эмулятором, обеспечивающей управление работой двигателя в стендовых условиях, необходимыми соединительными элементами (разъёмами, шнурами и т.д.).

3. Общие положения.

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

4. Условия и порядок проведения испытаний.

4.1 Испытания проводятся в моторном боксе, содержащем оборудование в соответствии с ГОСТ 14846 - 81, при температуре воздуха T_a от 15 до 40 °С и давлении соответствующем среднестатистическим значениям изменения атмосферного давления.

4.2 В период проведения испытаний техническое обслуживание и эксплуатация генератора СГ проводится представителями разработчика, по заключению которых к обслуживанию могут быть допущены сотрудники, прошедшие стажировку и получившие соответствующие навыки.

4.3 Метрологическое обеспечение.

Применяемые в испытаниях средства измерений должны иметь технический паспорт и действующие сроки поверок.

В случае отсутствия аттестованных средств измерения допускается применять не аттестованные, однако при этом необходимо проведение не менее 3 повторных экспериментов на одном выбранном режиме с определением погрешностей по ГОСТ 8-207-76. При величине погрешности не более 5% средство измерений считается возможным к применению в данных испытаниях.

4.4 Требования по технике безопасности.

Перед проведением экспериментальных работ разрабатывается и утверждается инструкция по ТБ. К работам допускаются лица, прошедшие инструктаж с росписью в журнале.

Испытательный бокс оснащается системой сигнализации СИКЗ-1 и электромагнитным клапаном МКГ-3020.

5 Методы испытаний.

5.1 Подготовка стенда и методика предварительных испытаний генератора СГ.

Для проведения испытаний моторный бокс дополнительно к стандартному оборудованию (по ГОСТ 14846-81) оснащается системами подачи сжатого природного газа, генератором СГ, системами подачи газа и воздуха в генератор СГ и системой сигнализации утечек природного газа. Общая схема данных систем приведена на рисунке 1 приложения В.

Система подачи природного газа включает баллон высокого давления, редукторы Р1, манометры М1, М2, М3. Подача ПГ в двигатель осуществляется форсунками Ф1 -Ф4 в количестве 4 шт.

Система подачи природного газа в генератор СГ включает вентиль В2, редуктор Р2, манометр М2, ЭПК двойного действия, расходомер и форсунка(и) Ф5.

Система подачи воздуха в генератор СГ включает воздушный внешний компрессор КОМП., редуктор Р3, воздушные форсунки Ф6-Ф8 , блок управления БУВ.

Работа системы осуществляется следующим образом. Открытием вентиля В1 и редуктора Р1 заполняется расходная ёмкость, демпфирующая возможные колебания давления в магистрали подачи газа. При этом давление в магистрали устанавливается равным 0,185 МПа, которое является рабочим давлением магистрали подачи природного газа в двигатель посредством форсунок Ф1.

Газовые форсунки Ф1-Ф4 управляются посредством эмулятора штатной ЭСУД двигателя на базе контроллера Январь 4.0, чем достигается управление работой двигателя.

Редуктор Р2 в магистрали подачи ПГ в генератор СГ понижает давление до величины $p \leq 0.185$ МПа (уточняется при проведении испытаний), являющейся рабочим давлением питания генератора СГ.

Дозирование природного газа, поступающего с генератор СГ, осуществляется форсункой Ф5, управляемой системой ПРОТЕРМ, входящей в состав генератора. При этом, расход газа определяется частотой работы форсунки при постоянной длительности её открытия и рабочем давлении на входе.

Расход природного газа определяется по продолжительности падения давления в расходной емкости РЕ от некоторого определенного давления Р2 до Р1.

Подача СГ в двигатель управляется ЭПК двойного действия: при запуске генератора и его отладке (без работы ДВС) данный клапан выпускает СГ в атмосферу, где он дожигается; при работе двигателя СГ подаётся во впускную трубу перед дроссельной заслонкой.

После сборки и поэлементной отладки стендовых систем и генератора СГ производятся предварительные испытания, в результате которых определяются и уточняются необходимые параметры и настройки генератора СГ.

Последовательность выполнения испытания при работе генератора СГ с ДВС. Совместная работа генератора с ДВС выполняется в следующей последовательности:

- производится настройка и контроль работы на заданные уровни давлений редукторов Р1 и Р2;
- по методике ИК СО РАН производится запуск генератора СГ с выпуском продуктов посредством ЭПК в атмосферу (с их дожиганием);
- устанавливается заданный режим работы генератора СГ по производительности и составу СГ;
- запускается ДВС, прогревается и устанавливается заданный режим его работы, характеризуемый частотой вращения вала двигателя и нагрузкой,

после чего, в зависимости от количества подаваемого СГ и режима ДВС, может проводиться опережающая коррекция по коэффициенту избытка воздуха;

- открытием ЭПК синтез-газ подаётся в ДВС и производится установка заданного режима его работы при оптимальных значениях угла опережения зажигания (УОЗ).

Порядок обработки, анализа и оценки результатов испытаний.

В процессе проведения испытаний регистрируются следующие параметры, наименование и расположение которых приведены в таблице В1

Таблица В1 - Параметры регистрируемые в ходе выполнения испытаний

№	Параметр	Тип измерительного средства	Количество каналов измерений	Места установки первичных измерителей
1	Температура	Термопара Х-А	9	Каталитический блок генератора СГ
2	-//-	Термопара Х-К	2	Магистраль подачи ПГ в генератор СГ и ДВС
3	-//-	Термопара Х-К	1	Выпускной коллектор ДВС
4	Давление.	Манометры образцовые кл.0,4	6	В соответствии со схемой (приложение А)
5	Состав отработавших газов ДВС.	Газоанализатор МЕТА	5 (CO, CH, NO _x , O ₂ , CO ₂)	Выпускная труба ДВС
6	Состав синтез газа.	Газоанализатор ГИАМ	2(H ₂ , CO)	Магистраль подачи синтез газа.
7	Частота вращения вала ДВС.	Индукционный Датчик	1	ДВС
8	Мощность ДВС	Гидравлическое тормозное устройство SCHENK	1	Моторный бокс
9	Расход воздуха в ГСГ	Термоанемометр Аналоговый	1	Магистраль подачи воздуха в генератор СГ
10	Расход воздуха	Термоанемометр частотный	1	Впускная труба ДВС
11	Расход ПГ	Форсунки ДВС	4	Магистраль подачи газа в ДВС
12	Расход ПГ	Форсунка генератора СГ	1	Магистраль подачи газа в генератор.
13	Расход бензина	Штихпробер, ЭСУД ДВС	1	Магистраль подачи бензина.

Регистрация результатов измерений производится в соответствии с предусмотренными данным типом устройств возможностями: манометров, газоанализатора ГИАМ - визуально, температуры с выводом на дисплей ПЭВМ и записью в файл на диск, газоанализатора МЕТА - на печатающее устройство, параметров работы ДВС - в соответствии с предусмотренными ЭСУД возможностями программного управления.

Обработка результатов испытаний выполняется в следующем порядке:

Параметры работы генератора СГ:

-производительность (расход СГ) определяется по формуле:

$$G_{CG} = \mu * (G_{\text{с}} + G_{\text{ПРГ}}),$$

где G_{CG} , $G_{\text{с}}$, $G_{\text{ПРГ}}$ – расход, соответственно, синтез-газа, воздуха и природного газа, поступающих в генератор синтез-газа, μ - коэффициент увеличения объема, определяемый по методике ИК СО РАН.

-количество теплоты, подведённое с топливом в ДВС, рассчитывается по формулам:

$$Q_{\text{sigma}} = H_u * (G_{\text{ДВС}} + G_{\text{ГСГ}}),$$

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

$$Q = G_{\text{ДВС}} * H_u + Q_{CG},$$

где $G_{\text{ДВС}}$, $G_{\text{ГСГ}}$ и H_u – расход природного газа (метана), в двигатель и генератор синтез-газа, соответственно, и его низшая теплотворная способность, G_j и H_{uj} – расход и низшая теплотворные способности, входящих в состав синтез-газа горючих веществ, в частности, водорода, оксида углерода и метана.

– КПД преобразования углеводородного топлива в синтез-газ определяется из формулы:

$$\eta = \frac{Q_{CG}}{G_{\text{ГСГ}} * H_u}.$$

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

- эффективная мощность определяется по формуле:

$$N_e = \frac{M \cdot n}{9550} \text{ [Вт]}$$

где M – крутящий момент двигателя, n – частота вращения коленчатого вала в 1/мин;

- расход газа через двигатель определяется по формуле:

$$G_z = 3,6 \frac{\Delta G_z}{\tau},$$

где $\Delta G_z = G_1 - G_2$ – разность массы газа в расходной емкости в начале и в конце измерения длительностью τ , которая определяется по формуле:

$$\Delta G = \frac{V}{R} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right),$$

где V – объем мерной емкости (см. схему приложения), P_1 и T_1 – давление и температура в мерной емкости в начале и P_2 и T_2 – в конце измерений.

В необходимых случаях (при ограничениях, связанных с величиной объема и допустимого давления в расходной емкости, например, при измерениях расхода газа на нагрузочных режимах) для измерения расхода газа через двигатель может применяться способ основанный на измерении длительности открытия газовой форсунки по формуле:

$$G_z = G_{z, \text{цикл}} \cdot n \cdot 1,2 \cdot 10^8 [\text{кг/час}],$$

где $G_{z, \text{цикл}}$ – расход газа через форсунку за один цикл (в мг).

Величина $G_{z, \text{цикл}}$ определяется из показаний контроллера ЭСУД и следующего выражения:

$$G_{z, \text{цикл}} = k \cdot G_{b, \text{цикл}},$$

где $G_{b, \text{цикл}}$ – расход бензина за один цикл, k – коэффициент, определяемый экспериментально по серии специальных работ на двигателе при его работе на бензине и газе на одинаковых режимах по нагрузке и оборотам и равных величинах коэффициента избытка воздуха.

$$k = \frac{G_{gz}}{G_{gb}} \cdot \frac{l_{об}}{l_{оз}},$$

где $G_{вз}$, $G_{вб}$, соответственно, расход воздуха через двигатель при работе на газе и бензине, $l_{об}$, $l_{оз}$ – стехиометрическое соотношение бензина и природного газа.

6 Требования к достоверности результатов и точности обработки информации.

Достоверность результатов обеспечивается повторным проведением экспериментов в ряде выбранных точек, а также статистической обработкой результатов измерений по ГОСТ 8.207-76 «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений».

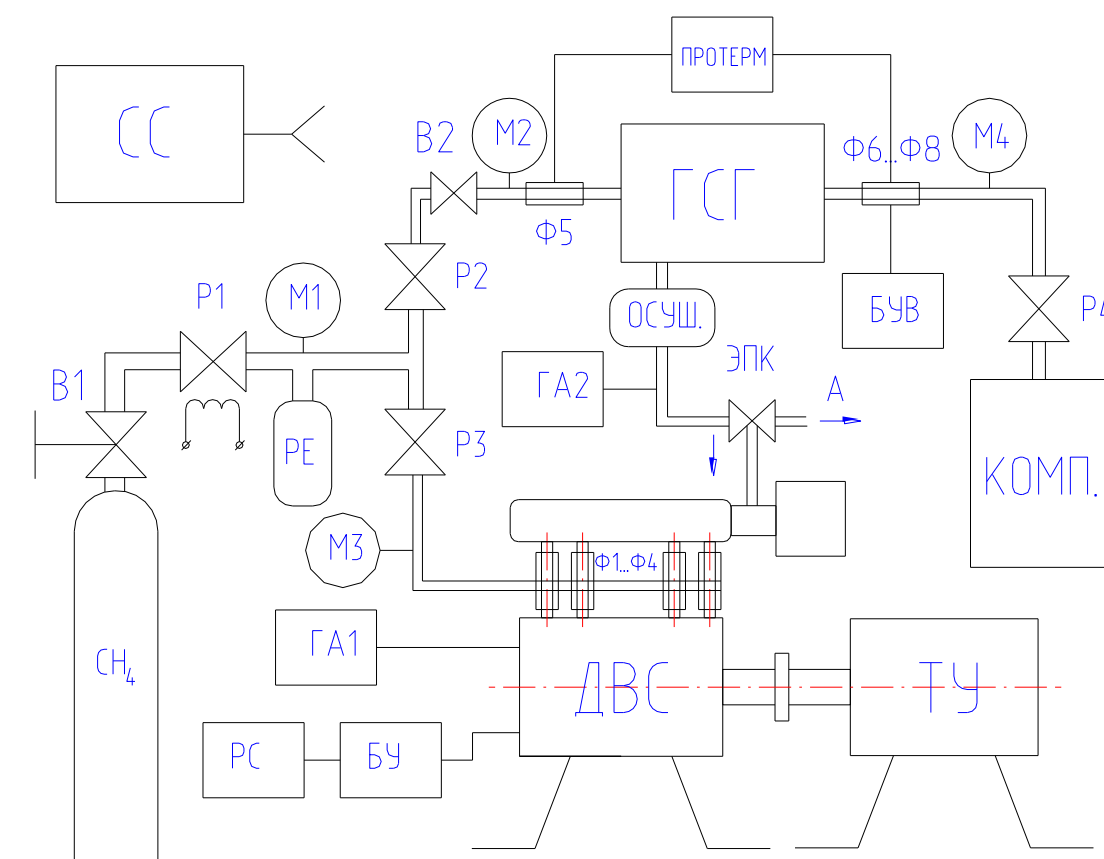


Рисунок В1 – Схема системы питания природным газом с добавкой синтез-газа.

На рисунке приняты следующие обозначения: ДВС - двигатель внутреннего сгорания; ГСГ - генератор синтез-газа; CH_4 - баллон с природным

газом; М1-М4 - манометры; Р1-Р4 - редукторы; В1-В2 - вентили ручные; Ф1-Ф4 - форсунки подачи природного газа в ДВС; Ф5 - форсунка подачи природного газа в ГСГ; Ф6-Ф8 - форсунки подачи воздуха в ГСГ; РЕ - расходная емкость; БУ - блок управления ДВС; РС - персональный компьютер; ТУ - тормозное устройство; ГА1-ГА2 - газоанализаторы; ЭПК - электропневмоклапан двойного действия; БУВ - блок управления подачей воздуха; КОМП. - стационарный компрессор; ПРОТЕРМ - блок управления ГСГ; СС –система сигнализации утечек газа; А - выход в атмосферу