

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»  
(наименование)

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

Энергетические комплексы и системы управления  
(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Монотопливный силовой агрегат на сжатом природном газе

Студент

Кучук Владислав Сергеевич

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

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

Тольятти 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1 Обзор двигателей и автомобилей на сжатом природном газе.....	7
1.1 Природный газ как топливо .....	7
1.2 Автомобили на сжатом природном газе .....	8
1.2.1 Мировой рынок автомобилей на природном газе .....	8
1.2.2 Обзор автомобилей на сжатом природном газе.....	8
1.2.2.1 Двигатели, работающие только на сжатом природном газе .....	9
1.2.2.2 Би-топливные двигатели .....	9
1.2.2.3 Двухтопливные дизельные двигатели .....	10
1.2.2.4 Производство силовых агрегатов.....	12
1.3 Технические аспекты двигателя на сжатом природном газе.....	16
1.3.1 Топливо-воздушная смесь .....	17
1.3.2 Преимущества обслуживания двигателя на сжатом природном газе .	17
1.3.3 Удельный расход топлива.....	18
1.4 Недостатки в работе двигателя .....	19
1.4.1 Низкая скорость воспламенения .....	19
1.4.2 Объемный КПД.....	20
1.5 Экологичность .....	22
1.6 Экономичность ДВС на природном газе .....	26
1.7 Безопасность применения автомобилей на сжатом природном газе.....	28
1.8 Препятствия для адаптации транспортных средств под природный газ ..	29
Выводы по главе.....	31
2. Экспериментальное исследование .....	34
2.1 Исследование на основе одноцилиндрового двигателя с искровым зажиганием.....	34
2.1.1 Методология исследования.....	36
2.1.2 Результаты исследования .....	38
2.1.3 Заключение на основе поставленного эксперимента.....	45
2.2 Исследование мощности двигателя на основе 1,7 литрового турбированного двигателя .....	46
2.2.1 Общая информация о двухтопливном турбированном двигателе.....	47

2.2.2 Экспериментальная установка.....	51
2.2.3 Процедура тестирования.....	55
2.2.3.1 Тесты производительности бензина и сжатого природного газа .....	55
Выводы по главе.....	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## Введение

Сегодня в мире потребляется в общей сложности 12 730 миллион тонн энергии, из которых 7205 миллион тонн нефти и природного газа. Транспортный сектор с более чем одним миллиардом эксплуатируемых легковых автомобилей является основным потребителем нефти во всем мире, увеличившись с 45,5% в 1973 году до 59% в 2011 году в основном в виде бензина и дизельного топлива. Хорошо известно, что запасы нефти истощаются с угрожающей скоростью. Кроме того, сжигание этих традиционных видов топлива транспортным сектором в значительной степени способствует загрязнению атмосферы, что угрожает планете. Функции современных двигателей внутреннего сгорания должны быть пересмотрены для уменьшения загрязнения. Энергетический кризис и серьезное загрязнение окружающей среды во всем мире привели к тому, что разработка низкоэмиссионных и высокоэффективных топливных транспортных средств стала главной целью исследований автомобильных заводов. В транспортный сектор были введены различные альтернативные виды топлива, такие как пропан, биодизель, водород, топливные элементы. Из этих доступных альтернативных видов топлива сжатый природный газ (CNG) является тем продуктом, который удовлетворяет максимальные потребности стран во всем мире, желающих перейти на альтернативные виды топлива. CNG считается одним из лучших решений для замещения ископаемого топлива из-за присущей ему чистоты природы горения. В настоящее время он признан во всем мире экологически чистым топливом. Ниже приведены основные особенности, которые способствовали повышению интереса к использованию природного газа в качестве транспортного топлива:

1. Широкая доступность;
2. Экологически чистый продукт;
3. Низкие эксплуатационные расходы.

Практически в каждой стране мира есть добыча газа, следовательно, сжатый природный газ является широкодоступным видом топлива на земле. На территории Российской Федерации каждый год добываются миллионы кубометров газа, он предназначен для отопления помещений, приготовления пищи, заправки автомобилей и так далее.

По подсчетам российских ученых около 90 % загрязнений окружающей среды приходится на автомобильный сектор, перевод этого сектора на природный газ приведет к уменьшению выброса вредных веществ в атмосферу, поэтому газобаллонные автомобили являются перспективным направлением разработки для всех автопроизводителей в мире. Выбросы CO газобаллонного грузовика в 10 раз ниже, чем аналогичного с дизельным мотором. Также ученые рассчитали, что при сгорании 1000л топлива, в атмосферу выбрасывается 200-300 килограммов оксида углерода, 20-40 килограммов углеводорода и примерно 20-45 кг NOx. При использовании CNG автомобилей эта статистики понижается в 2-3 раза по оксиду углерода, в 2 раза по окислам азота, примерно в 3 раза по углеводородам, а сажа, которая присутствует при сгорании дизельного топлива и вовсе отсутствует. Из этого следует, что газ намного экологичен чем бензин и дизельное топливо.

В России на данный момент газ является самым доступным видом топлива для автомобилей. Один кубометр метана стоит примерно 14-15 рублей, а литр бензина стоит 45 рублей, следовательно, газ дешевле бензина в 3 раза, позволяя собственнику автомобиля на газе неплохо сэкономить. Помимо цены на топливо, государство всячески стимулирует покупку CNG автомобилей. Например, в Самарской области в 2020 году, правительство отменила налог на автомобили с сжатым природным газом. Данные преимущества помогают автолюбителям сделать выбор в пользу альтернативного топлива.

В данной работе будут рассмотрены все минусы двигателей на сжатом природном газе и варианты их решения.

Целью работы является анализ мощности двигателей на сжатом природном газе.

Для достижения цели работы решались задачи:

- изучение состояния конкретных вопросов, связанных с темой диссертации

- поиск и анализ информации связанной с потерей мощности двигателя при применении сжатого природного газа.

Объект исследования: двигатель на сжатом природном газе.

Предмет исследования: недостаток мощности двигателя на сжатом природном газе в сравнении с классическими ДВС.

Научная новизна работы:

- установлено различие между эксплуатацией классического двигателя внутреннего сгорания и двигателя на сжатом природном газе.

Практическая значимость работы:

- по результатам работы рассмотрены варианты решения проблемы низкой выходной мощности на CNG двигателях.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 2 научные статьи.

Структура и объем работы. Данная диссертация состоит из введения, 2 глав и выводов. Объем работы составляет 75 страниц, включая 19 рисунков, 7 таблиц.

В диссертации представлен тематический обзор на литературу, работы выполненные по теме исследования, а также представлено решение проблемы низкой выходной мощности при использовании газового топлива в двигателях.

Результаты работы позволяют оценить насколько данное решение является актуальным на сегодняшний день и позволяет ли решить проблему, поставленную в данной диссертации должным образом.

## **1 Обзор двигателей и автомобилей на сжатом природном газе**

### **1.1 Природный газ как топливо**

Природный газ, используемый в транспортных средствах на природном газе, является тем же самым природным газом, который используется в бытовом секторе для приготовления пищи и обогрева. CNG производится путем сжатия обычного природного газа (который в основном состоит из метана –CH<sub>4</sub>) до менее чем 1% объема, занимаемого им при стандартном атмосферном давлении. Он хранится и распределяется в жестком контейнере под давлением 200-248 бар (2900-3600 фунтов на квадратный дюйм), обычно в цилиндрических формах металлического цилиндра.

CNG становится одним из важнейших энергетических ресурсов и в настоящее время составляет 23% мирового первичного потребления [1]. По данным издания “Cedigaz”, доказанные запасы природного газа в мире на 1 января 2014 года составляют 7080,3 трлн куб. м, что соответствует более чем 60-летнему запасу при текущих уровнях годового потребления 118,20 трлн куб. м., также можно отметить, что природный газ превзойдет уголь до 2030 года и покроет 25% общего спроса на энергию в 2035 году [2]. Прогноз будущих потребностей в энергии на IEO2014 показывает, что природный газ является самым быстрорастущим первичным источником энергии в будущем, и его потребление, по прогнозам, удвоится между 2020 и 2040 годами [4]. В докладе прогнозируется, что растущая добыча природного газа из трудноизвлекаемых сланцевых пластов позволит удерживать цены на природный газ для потребителей на уровне цен 2005-2008 годов до 2038 года [3]. Это привело к росту интереса к использованию природного газа в качестве транспортного топлива. Текущее годовое потребление природного газа в качестве транспортного топлива составляет 1,205 трлн куб. м, что составляет лишь 1,01% от общего мирового спроса на природный газ.

## **1.2 Автомобили на сжатом природном газе**

### **1.2.1 Мировой рынок автомобилей на природном газе**

Во всем мире количество транспортных средств, работающих на природном газе, растет так быстро, что статистические данные отстают и нет надежных источников информации. Однако, согласно последним достоверным источникам, мировым лидером по CNG автомобилям (на данный момент) является Иран с 4,07 млн. Следом за Ираном стоит Китай, с 3,99 млн. работающих. Данные показывают, что за последние десять лет во всем мире численность CNG автомобилей быстро увеличивалась в годовом исчислении на 24%, причем наибольший вклад вносили регионы Азиатско-Тихоокеанского региона и Латинской Америки. По прогнозам, эта тенденция сохранится со среднегодовым темпом роста в 3,7% до 2030 года. Сегодня существует более 18 миллионов транспортных средств, работающих на природном газе, распределенных по более чем 86 странам мира с основными концентрациями в Иране, Китае, Пакистане, Аргентине, Индии, Бразилии, Италии и Колумбии. Большинство (93%) транспортных средств с CNG-это легковые и коммерческие автомобили. Кроме того, во всем мире насчитывается более 26 677 заправочных станций с сжатым природным газом.

### **1.2.2 Обзор автомобилей на сжатом природном газе**

С точки зрения подачи топлива, существуют три типа двигателей для автомобилей на сжатом природном газе:

1. Двигатели, работающие только на сжатом природном газе;
2. Би-топливные двигатели;
3. Двухтопливные дизельные двигатели.



### **1.2.2.1 Двигатели, работающие только на сжатом природном газе**

Автомобили, работающие исключительно на сжатом природном газе, имеют двигатели, которые работают только на природном газе. Степень сжатия этих двигателей оптимизирована для использования преимущества высокого октанового числа природного газа и разработана с сохранением свойств сгорания природного газа, так что транспортное средство производит очень меньше выбросов загрязняющих веществ.

### **1.2.2.2 Би-топливные двигатели**

Би-топливный автомобиль может работать как на природном газе, так и на бензине. Тип двигателя, который они использовали, - обычный бензиновый двигатель внутреннего сгорания. Водитель может выбрать, какое топливо сжигать, просто щелкнув переключателем на приборной панели. Любой существующий бензиновый автомобиль может быть преобразован в двухтопливный. Большинство эксплуатируемых в настоящее время транспортных средств на CNG дооснащены бензиновым двигателем [5].

Пакистане, 2-м по величине потребителем CNG, почти весь парк автомобилей, работающих на сжатом природном газе, относится к категории двухтопливных транспортных средств. Свойства сгорания природного газа существенно отличаются от обычного топлива-дизеля и бензина [6].

По сравнению с дизельным и бензиновым ДВС, газ имеет более длительное время задержки воспламенения из-за низкой скорости распространения пламени. Таким образом, при использовании одного и того же бензинового двигателя для двух топливной системы, продолжительность горения становится относительно более продолжительной, и для этого требуется более заблаговременное зажигание. Следовательно, для работы обычного бензинового двигателя на природном газе необходима модернизация. Двухтопливные двигатели, как правило, оптимизированы для природного газа, причем время зажигания достаточно отодвинуто, чтобы приспособить более медленную скорость горения метана. На рисунке 7

изображена схема обычного модернизированного двухтопливного транспортного средства на газе.

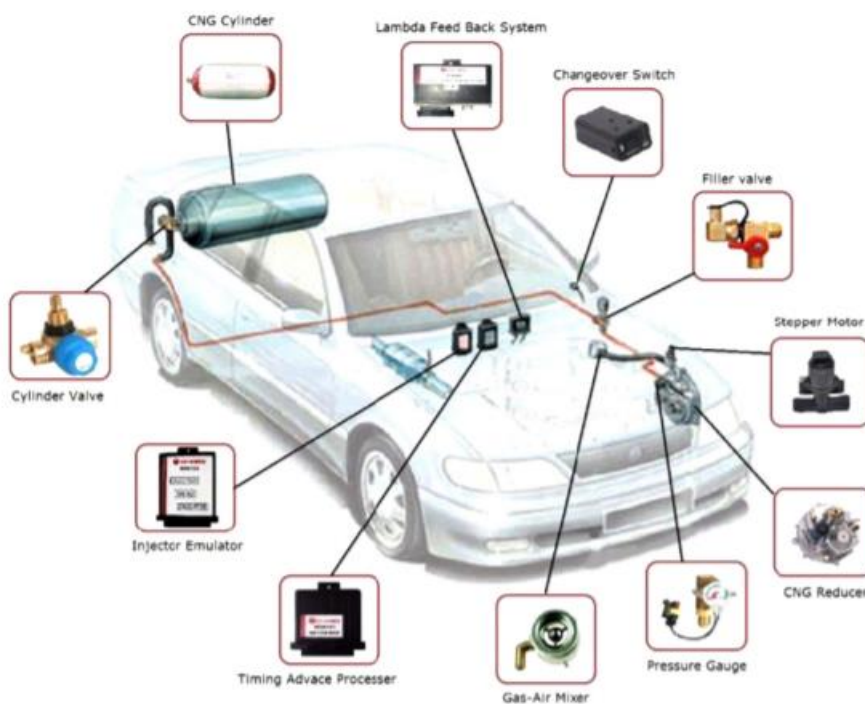


Рисунок 7 – схема модернизированного бензинового автомобиля на газу.

### 1.2.2.3 Двухтопливные дизельные двигатели

Двухтопливные транспортные средства основаны на технологии двигателя CI. Они работают либо только на дизельном топливе, либо используют смесь природного газа и дизельного топлива, причем смесь природного газа и воздуха зажигается дизельным “пилотом”. В режиме холостого хода эти двигатели, как правило, работают только на дизельном топливе. По мере того как автомобиль начинает подбирать нагрузку, природный газ заменяет дизельное топливо на 60-90%. Однако, как и в случае би - топливного транспортного средства, прямое преобразование невозможно из-за очень низкого цетанового числа природного газа в результате его очень высокой температуры самовозгорания, что требует либо преобразования в искровом зажигании, либо принятия двухтопливной системы. Из-за высокой температуры воспламенения природного газа, он

нуждается в очень высокой степени сжатия для самовозгорания, т. е. около 38:1. Вследствие этого газ должен воспламеняться с помощью другого топлива (дизельного) - пилотного впрыска. Дизельное топливо вводится непосредственно в камеру сгорания, а газ впрыскивается в воздухозаборник путем карбюрации. Затем газообразное топливо сжимается в такте сжатия двигателя. Далее дизельное топливо впрыскивается ближе к концу такта сжатия. При короткой задержке зажигания сначала происходит сгорание дизельного топлива, что приводит к воспламенению природного газа и провоцированию распространения пламени. Важным фактором для работы на двухтопливном топливе является коэффициент замещения, который определяется как доля энергоемкости топлива, поставляемого природным газом. Скорость замены варьируется в зависимости от нагрузки двигателя. Максимальная скорость замены до 90% может быть получена с помощью имеющихся в настоящее время двухтопливных двигателей. Скорость замещения влияет как на производительность двигателя, так и на выбросы. Издание "Egúsquiza" обнаружило, что удельный расход топлива на торможение увеличивается с увеличением процента замещения [7]. Они также отметили, что при более высоких нагрузках и с увеличением коэффициента замещения концентрация углеводородов имеет тенденцию к увеличению, в то время как концентрация CO сначала увеличивается до уровня замещения 70%, а затем снижается. NOx были единственным фактором выбросов, который демонстрировал тенденцию к снижению с соответствующим увеличением коэффициента замещения. Би-топливный автомобиль обеспечивает на 30-40% более высокий КПД двигателя, что впоследствии снижает расход топлива на 25% [8]. В обоих случаях существует дополнительная стоимость по сравнению с обычными дизельными и бензиновыми транспортными средствами, и эта дополнительная стоимость должна быть возмещена за счет экономии эксплуатационных расходов за счет стоимости топлива [9].

#### 1.2.2.4 Производство силовых агрегатов

Технология разработки CNG-двигателей и их конверсии хорошо зарекомендовала себя, и соответствующее конверсионное оборудование легко доступно. Во всем мире различные производители предлагают двигатели на сжатом природном газе либо в качестве специализированных (моно-топливных) двигателей Otto-цикла, либо в качестве дизельных двигателей dual fuel. В США компания Cummins Westport Inc. является ведущим поставщиком высокопроизводительных CNG двигателей для автомобильного рынка. Она проектирует и продает двигатели объемом от 6 до 12 л (195-400 л.с.) для коммерческих транспортных применений, таких как грузовики и автобусы.

Например, такой двигатель как Камминс Westport ISX12 G (298 кВт) – это силовой агрегат на сжатом природном газе, пригодный для различных типов тяжелых транспортных средств, включая грузовики для сбора отходов и транзитные автобусы. ISX12 G-это стехиометрический двигатель CNG, который использует проверенную стехиометрическую технологию рециркуляции выхлопных газов с охлаждением (SEGR), турбонаддув и последующую обработку через TWC для достижения стандартов выбросов EPA USA 2014 года.

Компания IVECO является европейским лидером в производстве и продаже двигателей и транспортных средств с технологией CNG. С 1994 года компания IVECO предлагает широкий ассортимент автомобилей, является одним из ведущих исследователей, производителей автомобилей и силовых агрегатов на природном газе в Европе, причем тысячи автомобилей эксплуатируются как государственными, так и частными органами власти. В настоящее время компания IVECO предлагает три основных типа двигателей: IVECO Sofim 3 л (100 кВт), изображенный на Рисунке 2; IVECO Tector 6 л. показан на Рисунке 3; и IVECO Cursor 8 л., мощностью 200 кВт (Рис.4). Все двигатели IVECO на природном газе используют специальный

двигатель CNG SI, работающий на стехеометрическом сгорании сгорел с TWC.

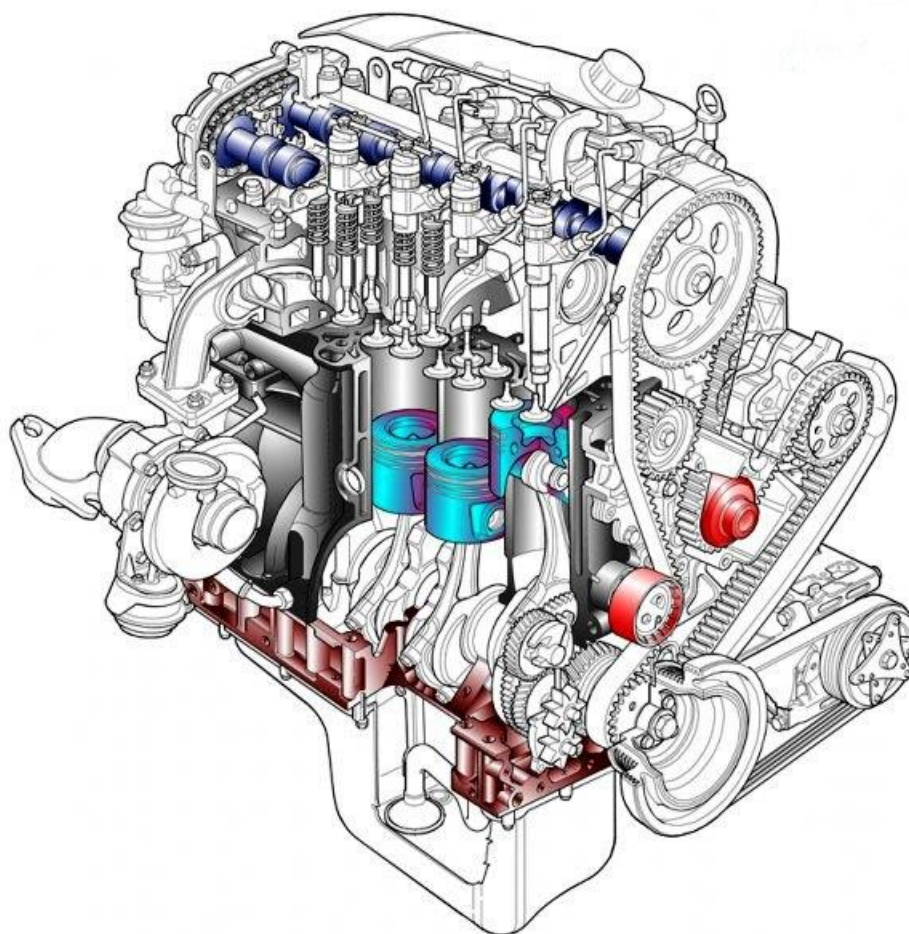


Рисунок 2 – схема ДВС Sofim 3 л. (100 кВт), производства ф. IVECO.



Рисунок 3 – ДВС Тестор 6 л. , производства ф. IVECO.



Рисунок 4 - ДВС Cursor 8 л. (200 кВт), производства ф. IVECO.

Автомобильная компания Volvo - третий по величине производитель автобусов на сжатом природном газе в Европе. Они предлагают, как двухтопливный, так и монотопливный двигатель CNG с 1992 года. Газовый двигатель Volvo FM Metan-Diesel D13C (Рис.5) - это 13-литровый (460 л. с.) двухтопливный двигатель с коэффициентом сжатия 17,8:1, работающий на 75% природном газе или биометане. Технология двигателя основана на обычном дизельном двигателе, оснащенный газовой форсункой. Под специальной категорией двигателей CNG они предлагают G9A, который представляет собой 9,4-литровый шестицилиндровый (260 или 300 л. с.) газовый двигатель с коэффициентом сжатия 10,25:1. Двигатель легко соответствует требованиям ЕС по выбросам выхлопных газов в соответствии с Евро-5 и EEV.

### VOLVO D13K Euro 6 with EGR and after treatment muffler

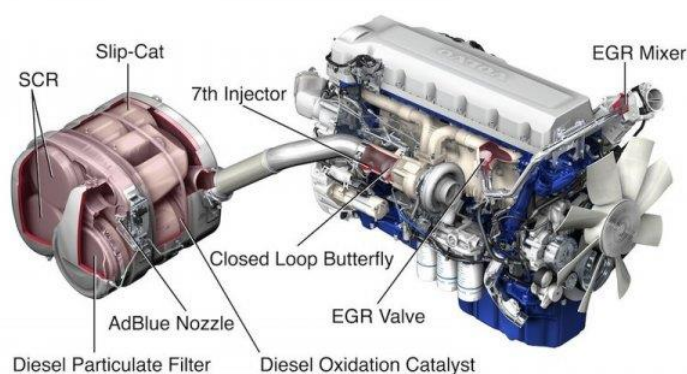


Рисунок 5 - двигатель Volvo FM Metan-Diesel D13C.

С 2006 года Mercedes-Benz выпускает специализированный CNG-двигатель M 447 hLAG (185 кВт), используемый в городских автобусах Mercedes-Benz Citaro с рейтингом Euro4/EEV. Недавно они представили шестицилиндровый монотопливный двигатель M-936G мощностью 302 л. с. (Рис 6.) Как и современный бензиновый двигатель, новый специализированный CNG-двигатель M-936G работает со стехиометрическим коэффициентом сгорания  $\lambda = 1$ , то есть он не использует ни избыточного воздуха, ни богатой смеси. Это приводит к особенно чистому сгоранию в сочетании с высокой выходной мощностью и низким уровнем выбросов выхлопных газов. Двигатель соответствует нормам выбросов Euro VI.

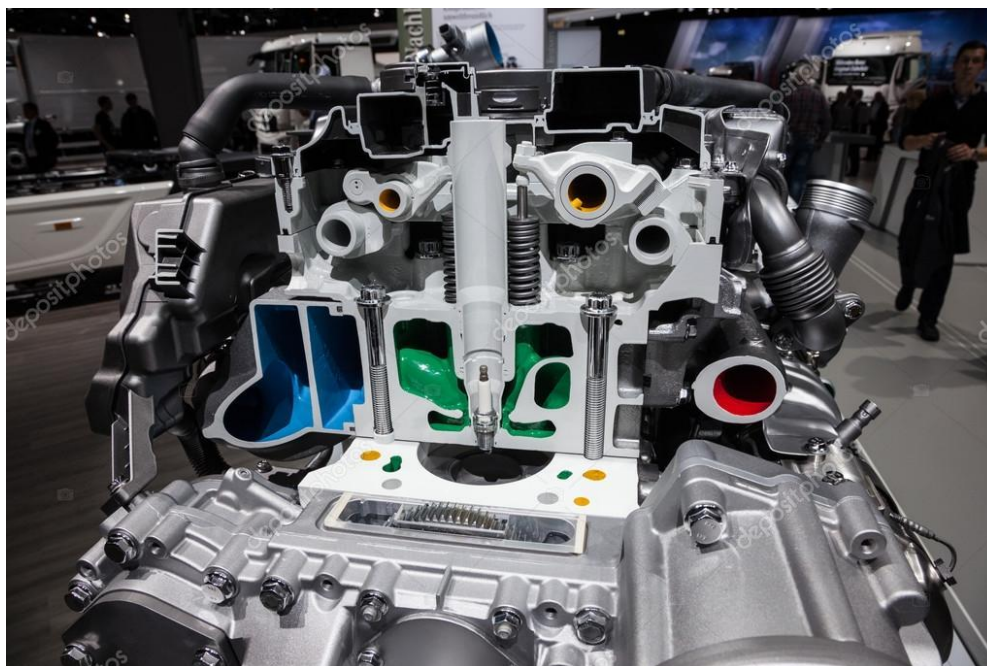


Рисунок 6 – разрез двигателя M-936G, производства ф. Mercedes-Benz

### 1.3 Технические аспекты двигателя на сжатом природном газе

Тепловая эффективность двигателей зависит от различных параметров, но, пожалуй, самым важным является степень сжатия двигателя. Чем выше степень сжатия, тем выше будет теоретическая, а также фактическая эффективность. Октановое число природного газа колеблется от 120 до 130, что означает, что двигатель может работать при степени сжатия до 16:1. Высокое октановое число позволяет специализированному CNG-двигателю использовать более высокую степень сжатия для повышения теплового КПД двигателя примерно на 10% выше, чем у бензинового двигателя [10]. Поэтому некоторые CNG-двигатели могут иметь КПД до 35% в отличие от 25% для бензинового двигателя. Кстати, модернизированные бензиновые



двигатели не будут иметь преимущества высокого октанового числа, так как степень сжатия будет установлена на уровне, необходимом для бензина. Преимущество высокой эффективности, приведенное выше, может быть достигнуто в специализированных двигателях CNG.

### **1.3.1 Топливо-воздушная смесь**

Молярная масса бензина (114,23 г/моль) значительно выше, чем у природного газа (16 г/моль). Будучи легковесным топливом, природный газ может производить гораздо более однородную топливо-воздушную смесь [11]. С другой стороны, жидкому топливу требуется время для полного распыления и испарения с образованием однородной ТВС. Сжатый газ, являясь газообразным топливом при нормальных атмосферных условиях, обладает неотъемлемым преимуществом высокой степени смешиваемости и диффузии с газообразным воздухом, что существенно для хорошего горения [12].

### **1.3.2 Преимущества обслуживания двигателя на сжатом природном газе**

Автомобили на сжатом природном газе имеют более низкие расходы на техническое обслуживание по сравнению с обычными автомобилями. Чандлер К, Эберт Е. из Национальной Лаборатории Возобновляемых Источников провели 12-месячный сравнительный анализ между CNG и дизельными транзитными автобусами, эксплуатируемыми вашингтонским управлением по транзиту метрополитена. Они обнаружили, что расходы на техническое обслуживание автобусов, работающих на сжатом газе, были на 12% ниже, чем у автобусов, работающих на дизельном топливе. CNG не загрязняет и не разбавляет моторное масло, что впоследствии увеличивает срок службы смазочного материала. Газ поступает в двигатель в

газообразном виде, в отличие от бензина, который поступает в двигатель в виде брызг или тумана и смывает смазочное масло из области поршневых колец, что впоследствии усиливает износ двигателя. Таким образом, сжатый природный газ сокращает расходы на техническое обслуживание и продлевает срок службы двигателя. Но по сравнению с дизельными и бензиновыми двигателями, CNG-двигатели требуют низкого содержания, сульфатированного зольного шлакового масла. Сульфатированная зола является характеристикой моторных масел на природном газе, что дает представление о способности масла нейтрализовать кислоты в процессе сгорания. Из-за своей газообразной природы природный газ является сухим и не обеспечивает абсолютно никакой смазочной ценности, что приводит к образованию сульфатированных золотых отложений на выпускных клапанах, содержащих сульфаты металлов, включая барий, кальций, магний, цинк, калий, натрий и олово. Большое количество этого остатка может привести к снижению теплопередачи, детонации, горению клапана и прилипанию или разрыву кольца.

Отсутствие концентрации свинца в сжатом газе способствует предотвращению свинцового обрастания свечей зажигания, тем самым продлевая срок службы поршневых колец и свечей зажигания [13]. Интервал между настройками для автомобилей на природном газе увеличился до 30 000 км. Аналогично интервал между заменами масла для автомобилей на природном газе может быть увеличен с 5000 до 10 000 дополнительных км в зависимости от того, как используется автомобиль.

### **1.3.3 Удельный расход топлива**

Удельный расход топлива является очень важной характеристикой для сравнения производительности двигателей внутреннего сгорания, работающих на различных видах топлива. Различные исследования подтвердили, что удельный расход топлива двигателей, работающих на CNG,

был на 12-20% ниже, чем у бензиновых во всем диапазоне скоростей [14-19].

Это можно объяснить следующими двумя факторами:

Более высокая теплотворная способность газа (47,5 МДж/кг) по сравнению с бензином (43,5 МДж/кг);

Медленное сжигание природного газа по сравнению с бензином.

Благодаря низкому удельному расходу топлива и более высокой теплотворной способности, двигатели на природном газе показывают на 5-12% более высокую тепловую эффективность в отличие от бензиновых двигателей.

## **1.4 Недостатки в работе двигателя**

Производительность двигателя, работающего на сжатом природном газе, сильно зависела от конструкции и типа двигателя. Однако главная проблема, с которой сталкиваются сегодня все исследователи и производители, — это потеря мощности в двигателе. Несколькими признаками CNG -топлива, влияющими на мощность двигателя, являются низкая скорость распространения пламени, потеря объемного КПД и отсутствие испарения топлива.

### **1.4.1 Низкая скорость воспламенения**

Несколько экспериментальных исследований показали, что скорость распространения пламени природного газа ниже в отличие от обычных видов топлива, таких как бензин и дизельное топливо. Эта более низкая скорость распространения пламени способствует увеличению общей продолжительности горения по сравнению с бензином / дизелем и позволяет выпускать большее количество несгоревшего природного газа через выхлопную трубу [12-15]. Поскольку метан ( $\text{CH}_4$ ) является основным компонентом в природном газе и среди углеводородов, метан имеет самую низкую скорость пламени [16]. Это приводит к увеличению потерь энергии

за счет теплопередачи, что впоследствии снижает выходную мощность двигателя с 5 до 10% [17].

Одним из эффективных методов решения проблемы медленной скорости распространения пламени природного газа является смешивание его с топливом, имеющим высокую скорость горения, например, водородом. Водород считается лучшей добавкой к природному газу из-за его высокой скорости распространения пламени (265-325 см/с) [17-19].

### 1.4.2 Объемный КПД

Одной из других серьезных проблем автомобилей на сжатом природном газе является газообразная природа топлива, которая приводит к снижению объемного КПД до 10% за счет вытеснения воздуха, доступного для надлежащего сгорания. Таким образом, максимальная потенциальная мощность снизится до 10% по сравнению с бензиновым двигателем в аналогичном состоянии. Это уменьшение обусловлено увеличением объема впускного воздуха, занимаемого газом. Используя уравнение состояния идеального газа, можно легко показать, что объем, занимаемый природным газом, больше, чем объем бензина в стехиометрической ТВС. В случае бензинового / дизельного двигателя к моменту поступления топливовоздушной смеси в цилиндр, жидкие частицы практически полностью испаряются, что увеличивает входное давление цикла, в то время как в случае CNG подаваемое топливо является газообразным; следовательно, такого повышения входного давления нет. Существует несколько способов повышения объемного КПД CNG-двигателей, таких как увеличение числа впускных клапанов на цилиндр, оптимизация газораспределения и подъема клапанов, использование турбины и проектирование модифицированного впускного коллектора; однако все это влияет на стоимость и надежность [20-23].

### 1.4.3 Низкая выходная мощность

Благодаря двум вышеперечисленным факторам, а именно скорости пламени и объемной эффективности, обычный CNG-двигатель дает меньшую мощность, чем бензиновый. Несколько экспериментальных исследований показали, что бензиновые транспортные средства, переоборудованные на природный газ, при работе теряют от 15% до 20% общей мощности. Было проведено много экспериментальных работ по анализу эксплуатационных характеристик двигателей, работающих на природном газе.

Ученые исследовали работоспособность 1468 см<sup>3</sup> 12-клапанного, четырех цилиндрового, двигателя, имеющего степень сжатия 9,2. Испытанный двигатель представлял собой преобразованный бензиновый двигатель на сжатом природном газе, оснащенный двухтопливной системой. Они обнаружили, что в среднем CNG дает на 16% меньше мощности, чем бензин [26-28]. Согласно их выводам, выбросы выхлопных газов и тормозная сила CNG были очень низкими по сравнению с бензиновым топливом. Их исследование показало, что мощность двигателя, работающего на газе, ниже, чем у бензинового двигателя. Также исследователи проводили экспериментальные работы на одноцилиндровом 4-тактном двухтопливном двигателе для измерения производительности испытуемого двигателя. Они отметили, что объемный КПД и тормозная сила двигателя, работающего на сжатом газе, были ниже, чем у бензинового двигателя. Еще одним экспериментом было влияние изменения опережения зажигания на производительность типичного двухтопливного 4-цилиндрового карбюраторного ДВС объемом 1600 см<sup>3</sup>. Согласно его результатам, максимальная мощность двигателя, вырабатываемая при работе на природном газе, была на 5-10% ниже, чем при работе на бензине [29-30].

Еще одним этапом экспериментов стало изучение эксплуатационных характеристик и выбросов выхлопных газов двухтопливного двигателя Mazda B2000i SI как на природном газе, так и на бензиновом топливе в широком диапазоне режимов работы двигателя. Их исследование показало,

что тормозная мощность и объемный КПД двигателя, работающего на газу, на 11-14% ниже, чем у бензинового двигателя [31-33]. Исследование также показало, что использование сжатого природного газа ведет к повышению тепловой эффективности на 18% по сравнению с бензином.

Фирузган оценил два поколения газовых топливных систем, включая смесительный тип и последовательный тип системы в двухтопливном двигателе (бензин/CNG). Он измерил различные параметры, включая производительность, выбросы и расход топлива битопливного двигателя. Он сообщил, что последовательная система заправки газом лучше, чем смесительный тип. Потери мощности в микшерном типе на 1,78% выше, чем у другого [34].

Для повышения эффективности работы двигателя на сжатом газе в качестве варианта превращения CNG в более перспективное транспортное топливо рассматриваются альтернативные способы впрыска топлива, такие как прямой впрыск и портовый впрыск газа в камеру сгорания. Непосредственный впрыск может увеличить абсолютную величину нагрева заряда цилиндра и улучшить интенсивность турбулентности для лучшего перемешивания перед зажиганием. Повышается КПД сгорания, что приводит к улучшению мощности и крутящего момента, снижению насосных и тепловых потерь. Однако разработка двигателя с непосредственным впрыском является дорогостоящей и технически сложной задачей. Это связано с необходимостью предварительной адаптации головки блока цилиндров с непосредственным впрыском топлива, а также с привлечением детальной калибровки системы управления двигателем [35].

## **1.5 Экологичность**

Использование природного газа в качестве транспортного топлива связано с рядом потенциальных выгод для окружающей среды, в частности с выбросами в атмосферу и шумом. По принципу “хорошо на колесах” CNG

является одним из самых чистых сжигаемых альтернативных автомобильных топлив, доступных сегодня на рынке. Выбросы от правильно функционирующих транспортных средств на основе сжатого природного газа обычно считаются более низкими, чем выбросы от работающих на бензине транспортных средств. Ряд международных исследований свидетельствует о том, что CNG может сократить выбросы. В Дели (индийская столица и второй по плотности населения город в мире) весь общественный автомобильный транспорт был переведен на газомоторное топливо в 2002 году после приговора Верховного суда Индии. Сегодня Дели располагает крупнейшей в мире системой общественного транспорта, работающего на газообразном топливе. Ученые провели исследование в Бразилии [36]. В качестве одного из пионеров в разработке модернизированных транспортных средств на основе CNG. Они пришли к выводу, что по сравнению с бензиновыми транспортными средствами использование конверсионных комплектов третьего поколения в переоборудованных транспортных средствах приведет к сокращению выбросов CO на 53%, выбросов неметановых углеводородов на 66% и выбросов CO<sub>2</sub> на 20%.

Растущее беспокойство в транспортном секторе вызывает воздействие выбросов углекислого газа (CO<sub>2</sub>) на глобальное изменение климата. Выбросы CO<sub>2</sub> при сжигании топлива в значительной степени зависят от соотношения водорода и углерода. Чем выше отношение водорода к углероду (H/C) топлива, тем меньше будет количество CO и CO<sub>2</sub>. Газ имеет самое высокое отношение водорода к углероду (почти 4:1), чем бензин (2,3:1) или дизельное топливо (1,95:1). Это привело к более низкой эмиссии CO<sub>2</sub> для CNG, чем для бензина или дизельного топлива. Исходя из химического равновесия горения газов, выбросы CO<sub>2</sub> от двигателя на природном газе могут быть снижены более чем на 20% в отличие от бензинового двигателя, работающего в том же режиме. Уровень CO<sub>2</sub> в транспортном средстве на сжатом природном газе также может быть ниже, чем в сопоставимом дизельном транспортном

средстве при том же соотношении, сохраняя при этом почти ту же тепловую эффективность в очень бедных условиях. Как правило, основываясь на топливной эффективности, испытанной Chive Fuels, Великобритания; CNG экономит 2,65 кг выбросов CO<sub>2</sub> на каждый галлон дизельного топлива. Если исходить из принципа "хорошо на колесах", то транспортные средства на природном газе производят на 29% меньше парниковых газов, чем сопоставимые бензиновые транспортные средства, и на 22% меньше, чем дизельные транспортные средства. CARB (California Air Resources Board) провела тщательный анализ по этому вопросу. Он определяет, что сжигание сжатого газа дает около 68г эквивалентных выбросов CO<sub>2</sub> на тепловыделения (это включает все выбросы метана), а сжигание обычного дизельного топлива и бензина дает около 95 г эквивалентных выбросов CO на МДж.

Еще одним крупным компонентом выбросов ДВС является окись углерода-СО, которая образуется при неполном сгорании. Помимо самого высокого отношения водорода к углероду, двигатели на природном газе обладают двумя дополнительными важными характеристиками:

1. Низкой теплотворной способностью по сравнению с бензином
2. Низкой скоростью распространения пламени по сравнению с другими видами топлива.

Эти два фактора снижают максимальную температуру внутри камеры сгорания и, следовательно, уменьшают диссоциацию от CO<sub>2</sub> к СО. Были проведены различные исследования, которые подтверждают, что эмиссия СО в двигателе на сжатом природном газе была значительно ниже, чем в бензиновом и дизельном транспортном средстве при различных режимах нагрузки.

Выхлопные газы транспортных средств также состоят из оксидов азота— NO<sub>x</sub>, которые являются побочными продуктами всех процессов сжигания топлива на основе углерода, и на долю глобального транспортного сектора приходится около половины общего объема выбросов NO<sub>x</sub>. Существует множество неблагоприятных последствий для здоровья,



связанных с выбросом NOx, таких как увеличение общей смертности, сердечно-сосудистой смертности и младенческой смертности. Ученые теоретически доказали, что образование NOx напрямую зависит от двух факторов: концентрации реагентов и температуры. Концентрация выбросов NOx тесно связана с соотношением воздух–топливо и температурой горения. Скудная воздушно-топливная смесь и высокая температура горения являются благоприятными условиями для образования NO. При сжигании бедной смеси используется много избыточного воздуха, обычно в два раза больше, чем требуется для полного сгорания топлива, в то время как с другой стороны, двигатели с богатой смесью работают при почти стехиометрическом соотношении воздух/топливо, которое точно достаточно для сжигания всего топлива. Этот избыточный воздух эффективно охлаждает пиковые температуры горения в цилиндре, что снижает производство NOx. Поскольку газ горит при более низкой адиабатической температуре пламени, чем бензин или дизельное топливо, что приводит к низким выбросам NOx. Исследования показали, что снижение содержания NOx на 50-80% возможно при эксплуатации большегрузных транспортных средств на природном газе вместо дизельного топлива.

Одним из основных вредных выбросов выхлопных газов, производимых двигателями внутреннего сгорания, являются твердые частицы (ТЧ). ТЧ, особенно с учетом серьезных последствий для здоровья, связанных с мелкодисперсными частицами, становится серьезной экологической проблемой в городских районах. CNG является потенциально выгодным топливом, поскольку выбросы ТЧ значительно снижаются при использовании природного газа, поскольку природный газ не содержит ароматических и полиароматических соединений и содержит меньше растворенных соединений серы, чем нефтяное топливо. Таким образом, вклад автомобилей на сжатом природном газе в образование смога может быть меньше, чем у сопоставимых бензиновых и дизельных транспортных средств. Результаты различных исследований основаны на реальных данных,

которые подтверждают потенциальное снижение выбросов твердых частиц в CNG-топливе. Эксплуатация метановых автобусов для замены существующих дизельных автобусов в городе Сантьяго сокращает ежегодные выбросы твердых частиц на 229 т / год, что приводит к ежегодному сокращению ТЧ 2. 5 на 0,33 мкг / м<sup>3</sup>. Еще одним потенциальным преимуществом автомобилей CNG является снижение неметановых углеводородных выбросов. Сжатый газ в основном состоит из метана, и поскольку метан не имеет молекулярных связей углерод–углерод, сжигание приводит к значительно более низкой вероятности выброса бензола, что, в свою очередь, означает снижение образования канцерогенных веществ и сажи, также природный газ содержит меньше ароматических веществ и имеет более высокое соотношение водород/углерод, причем оба эти вещества ответственны за уменьшение количества летучих органических соединений [37].

Хотя улучшение качества окружающего воздуха, безусловно, является одной из главных целей для властей, продвигающих автомобили на природном газе, некоторые результаты исследований выбросов были неудовлетворительными или даже хуже, чем у автомобилей на бензиновом топливе, из-за неправильного переоборудования, технического обслуживания и тд.

### **1.6 Экономичность ДВС на природном газе**

Одним из главных преимуществ природного газа является то, что он обеспечивает источник доступной энергии. Поскольку мир продолжает работать на дорогостоящих видах топлива, таких как дизельное топливо и бензин, низкая стоимость газа дает искру надежды. Хотя экологические аспекты и контроль выбросов были главной целью применения природного газа на автомобильном транспорте, особенно в крупных городах. Однако в последние дни с резким ростом цен на нефть, все более значимое

экономическое преимущество использования природного газа стало главной целью для многих новых пользователей. В большинстве стран газ намного дешевле на эквивалентный галлон, чем бензин и дизельное топливо, даже с учетом затрат, связанных с компрессией, и поэтому даже с учетом его более низкой тепловой эффективности для дизельного топлива существуют значительные экономические преимущества использования сжатого природного газа в качестве транспортного топлива. Для того чтобы сделать его пригодным к использованию, природный газ требует очень незначительной переработки от производственного поля до транспортного средства. С другой стороны, дизельное топливо и бензин должны быть отделены от сырой нефти и проходить через сложный процесс переработки. Кроме того, он менее подвержен колебаниям цен и его ресурсы более равномерно распределены по земле по сравнению с нефтью. Ценовое преимущество природного газа перед дизельным топливом и бензином часто рассматривалось как наиболее важный параметр для привлечения потребителя к переводу своего транспортного средства с обычного топлива на метан или пропан.

Министерство энергетики США подсчитало, что природный газ дешевле бензина на треть. Согласно отчетам, опубликованным агентством энергетической информации США, CNG в среднем стоит на 42% дешевле дизельного топлива в энергетическом эквиваленте и прогнозируется, что к 2035 году этот показатель достигнет 50%. Аналогичным образом Republic Services, вторая по величине компания по управлению отходами в США, добилась 50% снижения стоимости топлива за счет развертывания природного газа на нескольких флотах. Недавно Министерство энергетики США провело опрос об альтернативном транспортном топливе и выяснило, что в отличие от обычного бензина топливные парки могут сэкономить около 50% на стоимости топлива с помощью применения газа [38].

## **1.7 Безопасность применения автомобилей на сжатом природном газе**

Безопасность применения автомобилей на сжатом природном газе является очень важным аспектом. Для многих становится неожиданностью, что природный газ является одним из самых безопасных видов топлива для транспортировки. Природный газ во многих отношениях безопаснее бензина. Автомобили на природном газе — это безопасная альтернатива с проверенным послужным списком. Проведенное в 1992 году AGA обследование более 8000 транспортных средств показало, что при проезде более 278 миллионов миль уровень травматизма NGV на одну пройденную милю транспортного средства был на 34% ниже, чем для бензиновых транспортных средств. О жертвах не сообщалось, хотя эти транспортные средства участвовали в более чем 1800 столкновениях.

Физические свойства газа дают некоторые преимущества в плане безопасности по сравнению с дизельным топливом и бензином. Они заключаются в следующем:

1. В отличие от бензина, газ имеет узкий диапазон воспламеняемости, от 4,3% до 15,2% по объему в воздухе, это означает, что при концентрациях в воздухе ниже 4,3% и выше 15,2% природный газ не будет гореть даже в присутствии искры.
2. Газ имеет высокую температуру самовозгорания 540°C по сравнению с 258°C бензина и 316°C дизеля. Температура самовоспламенения — это самая низкая температура, при которой топливо воспламеняется только за счет тепла, без какой-либо внешней искры или пламени. Высокая температура воспламенения и узкий диапазон воспламеняемости природного газа уменьшают вероятность случайного воспламенения и сгорания топлива.
3. Природный газ легче воздуха, поэтому в случае случайной утечки очень низкая плотность газа при атмосферном давлении - 0,68 кг/м<sup>3</sup>

по сравнению с воздухом -  $1,202 \text{ кг/м}^3$ -означает, что CNG будет быстро подниматься и рассеиваться в воздухе, а не образовывать лужи на земле, как в случае дизельного топлива и бензина, что снижает вероятность пожара в случае прорыва цистерны.

4. Баллоны для газа сконструированы и изготовлены из специальных материалов, чтобы противостоять высоким давлениям, с коэффициентом запаса прочности, который обычно превышает два, следовательно, безопаснее, чем обычные бензиновые баки.

Вышеуказанные физические свойства не гарантируют того, что транспортное средство на сжатом природном газе безопаснее дизельного. Например, в Пакистане, 2-м по величине потребителе природного газа, за последние несколько лет наблюдалось несколько аварий, связанных с транспортными средствами на основе природного газа. Но это главным образом из-за низкого качества материала системы, например, цилиндра, конструкции и установки, системы технического обслуживания и т.д., ошибки водителя и отсутствие строгих государственных правил безопасности транспортных средств CNG в Пакистане. Потребителю, использующему автомобильное средство на сжатом природном газе должна быть предоставлена достаточная информация о безопасности, касающаяся вопросов безопасности, связанных с CNG, таких как утечка газа, методы профилактики и контроля, а также аварийное реагирование в случае столкновения транспортного средства и пожара [39].

### **1.8 Препятствия для адаптации транспортных средств под природный газ**

В настоящее время автомобили с природным газом прочно закрепились на мировых транспортных рынках, но по-прежнему существует много препятствий для их широкого использования. Некоторые из проблем, связанных с транспортными средствами на сжатом природном газе, продемонстрированы ниже:

1. Одним из наиболее важных вопросов, касающихся транспортных средств, работающих на природном газе, является дальность движения, которая определяется как способность преодолевать определенное расстояние после каждой заправки. По объему 1 м<sup>3</sup> природного газа примерно соответствует 1,0 л бензина или 1,1 л дизельного топлива. Из-за этого более низкая плотность энергии природного газа по сравнению с бензином или дизельным топливом, занимает в 3-4 раза больше места для хранения, чем бензин или дизельное топливо, что соответственно уменьшает дальность хода автомобиля. Дальность движения является главным препятствием в развитии и росте природного газа как транспортного топлива.
2. Другая проблема с автомобилями, экспатрирующимися на сжатом газе, это потеря грузового пространства. Баллоны для газа большие и занимают много места для хранения и, как правило, должны быть размещены в багажнике автомобиля. Благодаря этому значительно уменьшается грузовое пространство почти на 50% по сравнению с обычным автомобилем. Но этот недостаток был теперь исправлен специальным транспортным средством, работающим на сжиженном природном газе, у которого баллоны находятся не в багажнике, а под всем транспортным средством, так что багажное отделение не уменьшается.
3. Еще одна особенность эксплуатации автомобиля на сжатом природном газе – это большое время заправки относительно дизельного или бензинового транспортного средства, и иногда пользователю приходится часами ждать в длинных очередях, чтобы заправить свой автомобиль из-за недостаточного количества заправочных станций в районах. Заправка считается "наименее безопасным" моментом его использования. Недостаточное количество заправочных станций является

препятствием для охвата потребителей. Результаты исследований показали, что для устойчивого использования природного газа в качестве транспортного топлива необходимо решить два условия. Во-первых, для того чтобы станции были прибыльными, на каждой заправочной станции должно быть не менее 1000 автомобилей с природным газом. Во-вторых, чтобы минимизировать время заправки и облегчить работу автомобилистов, минимальный диапазон заправок должен составлять не менее 10-20% от числа бензиновых/дизельных станций.

4. Для транспортных средств большой грузоподъемности, работающих в сельской местности, переход на CNG связан с рядом проблем, включая отсутствие строгой заправочной инфраструктуры, более высокие капитальные затраты на автомобили и ограниченное предложение двигателей. Пока не будет создана конкурентоспособная инфраструктура для заправки сжатым газом это альтернативное топливо будет проблематичным для дальних перевозок с нерегулярными маршрутами [40].

### **Выводы по главе**

Большинство автопроизводителей во всем мире переходят на альтернативные источники топлива для автомобилей. Это связано с тем, что человечество начало задумываться о глобальном загрязнении планеты, поэтому правительство многих стран ужесточают требования по эмиссии выхлопных газов автомобилей.

В данный момент существует всего три концепции автомобилей на сжатом природном газе – это двигатели, работающие только на CNG; би-топливные двигатели и двухтопливные дизельные двигатели.

Производство силовых агрегатов, работающих на сжатом природном газе, началось еще в далеком 1994 году. Европейским лидером по производству и продаже двигателей и автомобилей на CNG компания IVECO.

Главным преимуществом для производителей CNG двигателей является их экологичность. Выбросы углекислого газа и углеводородов снижаются, за счет применения в двигателе газа, поэтому данные силовые агрегаты могут пройти аттестацию по новым жестким требованиям по выбросам. Например, нормы евро-6, меняются чуть-ли не каждый год, в каждой редакции требования по выбросам CO становятся все жестче. Еще одно преимущество этих двигателей – это их экономичность. Для потребителя этот показатель очень важен при выборе автомобиля. Многие люди готовы пожертвовать мощностью автомобиля в угоду экономичности.

Однако у этих двигателей есть один существенный недостаток – это низкая выходная мощность. При применении в двигателе сжатого природного газа, его объемный КПД уменьшается, вследствие чего теряется мощность двигателей. Этот недостаток не является ключевым моментом для покупки автомобиля на CNG, поэтому люди часто покупают такие машины, например в транспортные компании, т.к. они экономичны.

Многие потребители CNG автомобилей скептически относятся к такому понятию как безопасность. Они считают, что газ не безопаснее бензина, однако это не так. В отличие от бензина газ имеет низкий диапазон воспламеняемости, поэтому во многих случаях газ не будет гореть даже в присутствии искры. Второе преимущество газа против бензина (дизеля) – это высокая температура самовозгорания. Также природный газ легче воздуха, поэтому в случае утечки он просто рассеется и не будет оставаться луж на земле, как это делают бензин и дизель, что снижает уровень вероятности пожара.

Одним из более значимых препятствий для адаптации автомобилей под природный газ являются заправочные станции. Они не так популярны, как



классические заправки и являются недоступными во многих отдаленных регионах. Еще одним препятствием является грузоподъемность автомобиля на сжатом газе. При применении CNG технологии пространство и грузоподъемность уменьшаются, вследствие чего люди отказываются от газа.

## **2. Экспериментальное исследование**

В данной главе будут рассмотрены два исследования, который показывают влияние природного газа мощность двигателя с искровым зажиганием, а также будет сделан вывод на основе этих исследований.

### **2.1 Исследование на основе одноцилиндрового двигателя с искровым зажиганием**

Бензин является одним из источников энергии для двигателя внутреннего сгорания. Однако потребление этого источника энергии увеличилось с увеличением численности населения в мире. Кроме того, двигатель внутреннего сгорания также является одним из факторов, вызвавших загрязнение окружающей среды.

Продукты сгорания от ДВС очень вредны и поэтому с ними пытаются бороться. Основными вредными выбросами жидкого топлива являются выбросы CO и NO<sub>x</sub> [1]. Поэтому автомобильные эксперты ввели альтернативное топливо, и это альтернативное топливо теперь внедряется в двигатель внутреннего сгорания. Альтернативные виды топлива, которые в настоящее время внедряются, представляют собой природный газ, биодизель, водородный газ и т. Д. Причиной введения этих альтернативных видов топлива является уменьшение глобального потепления, вызванного выбросами, и преодоление проблем с истощением нефтяных запасов.

Основное внимание в этом исследовании приковано к природному газу. Природный газ также получают из ископаемого топлива, которое похоже на жидкое или дизельное топливо. Однако природный газ можно рассматривать как возобновляемую энергию из-за рециркуляции метанового газа [2]. Но мощность, получаемая из природного газа, не такая высокая, как у жидкого топлива. Более подробно свойства природного газа можно наблюдать в Таблице 1 [3].

Таблица 1 – Свойства природного газа.

Состав	Объем (%)
Метан	95,3
Этан	2,16
Пропан	0,19
Н-бутан	0,02
Изо-бутан	0,02
Н-пентан	0
Изо-пентан	0
Гексаны плюс	0
Азот	1,86
Двуокись углерода	0,44
Кислород	0
Водород	0

Из таблицы 1 следует, что основным веществом природного газа является метан. Как упоминалось ранее, метан можно рассматривать как возобновляемое топливо и применять в двигателе внутреннего сгорания. Реализация природного газа в двигателе внутреннего сгорания дает уменьшение по показателям выбросов вредных веществ в атмосферу, но основная проблема заключается в том, что он дает более низкую мощность в сравнении с бензином и дизельным топливом [4, 5]. Эта работа была направлена на исследование производительности природного газа в одноцилиндровом двигателе, и она показала, что на производительность CNG двигателя по сравнению с классическим ДВС влияют различные свойства, показанные ниже в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства натурального газа и жидкого топлива.

Свойство	Жидкое топливо	Газ
Плотность (кг/см <sup>3</sup> )	750	0,725
Теплотворная способность (МДж/кг)	44	45
Октановое число	95	120
Температура воспламенения (°С)	280	650

### 2.1.1 Методология исследования

Исследование было посвящено анализу мощности двигателя при добавлении в него метана. Испытываемый двигатель был оборудован комплектом оборудования, которое ставится при доводке автомобиля для эксплуатации на сжатом природном газе. Система была испытана с использованием гидравлического динамометра, который работает на двух разных источниках топлива. В качестве топлива используется газ и жидкое топливо. Данные этих двух различных видов топлива были сопоставлены и проанализированы. На рисунке 7 приведена принципиальная схема динамометра с двигателем и комплектом для переоборудования автомобиля.

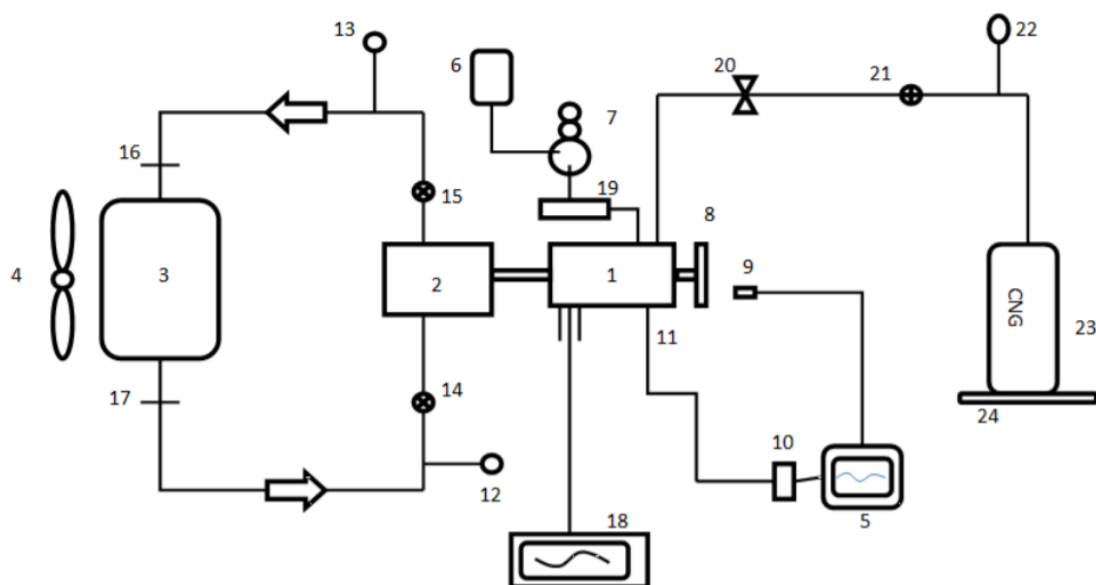


Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки: 1 – двигатель; 2 – гидравлический насос; 3 – гидравлический бак; 4 – вентилятор охлаждения; 5 – монитор для анализа процесса горения; 6 – топливный бак; 7 – топливный резервуар; 8 – коленчатый вал; 9 – декодер для коленчатого вала; 10 – усилитель; 11 – датчик давления; 12 – манометр; 13 – манометр; 14,15 – клапаны управления; 16,17 – термопары; 18 – газоанализатор; 19 – топливный насос; 20 – датчик расхода; 21 – регулятор давления; 22 – манометр; 23 – бак для газа; 24 – весы.

Фиксированной переменной во время этого эксперимента является обратное давление от гидравлического насоса. Обратное давление применяется только на 50% от определенной частоты вращения двигателя. Когда на двигатель подается 100% обратного давления, это приводит к остановке двигателя и указывает на то, что давление слишком высокое. Управляемая переменная - это частота вращения двигателя (об / мин).

Для вычисления общей теплопередачи от газа к охлаждающей жидкости цилиндра используются уравнения теплопередачи конвекционного типа.

$$\frac{Q}{A} = h(T_{\text{газа}} - T_{\text{мен}}) \quad (1)$$

где,  $Q$  – общая теплопередача ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $A$  – эталонная площадь цилиндра ( $\text{м}^2$ ),  $T_{\text{газа}}$  – эффективная температура газа, обычно  $800\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{теп}}$  – температура теплоносителя, как правило  $80\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h$  – коэффициент теплопередачи ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}$ ).

Изменение оборотов двигателя будут отражать характеристики тестируемого двигателя с разными типами топлива, когда и в каком случае используется жидкое топливо (бензин), а в каком природный газ. В таблице 3 приведена спецификация двигателя, который использовался в этом эксперименте. Результат этого эксперимента указывает влияние газа на выходную мощность двигателя по сравнению с жидким топливом.

Таблица 3 – спецификация двигателя.

Параметр	Значение
Тип	Одноцилиндровый
Диаметр поршня	67 мм
Ход поршня	52 мм
Такт	4 такта
Длина шатуна	91 мм
Рабочий объем цилиндра	$183\text{ см}^3$
Мощность	2,6 кВт/3600 об/мин

### 2.1.2 Результаты исследования

Из проведенных экспериментов были проанализированы данные при подаче газа в одноцилиндровый двигатель. Затем данные сравнивались с данными по жидкому топливу (бензину). Результаты эксперимента были сосредоточены на мощности, давлении в цилиндре и объемной эффективности (КПД). Эксперимент проводился путем приложения давления от гидравлического насоса к проверяемому двигателю. В таблице 4 показано давление, показанное манометром гидравлического насоса.

Таблица 4 – экспериментальные данные.

Обороты двигателя, об/мин	Давление жидкого топлива, бар	Давление сжатого природного газа, бар
2000	6	2
2500	9	4
3000	8	5
3600	10	6
4000	12	8

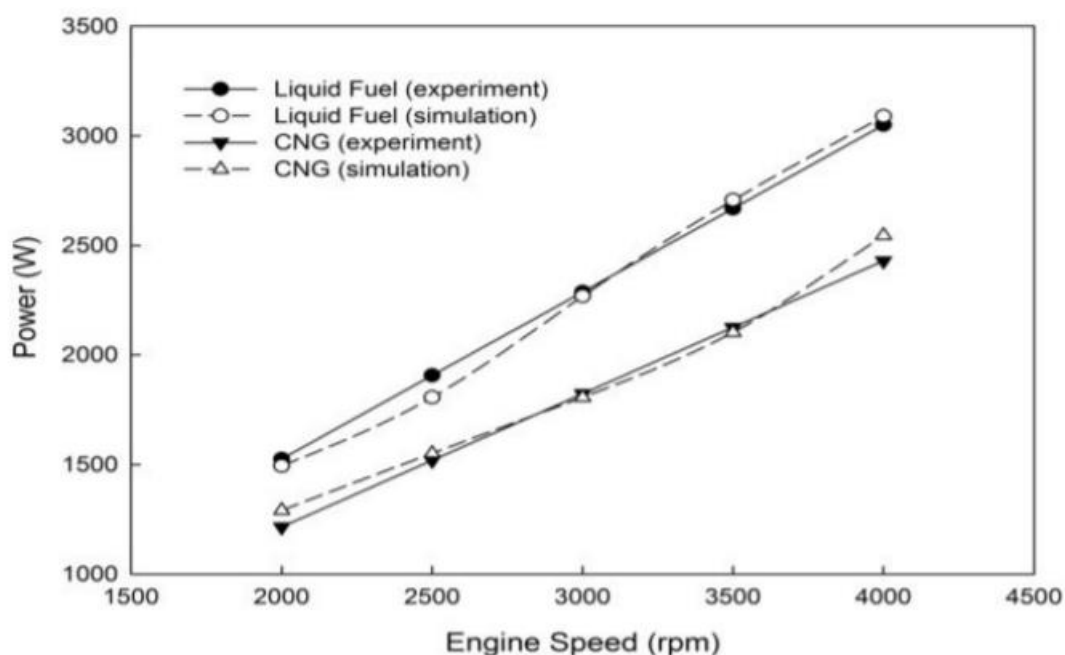


Рисунок 8 – производительность двигателя на разных видах топлива

Из результатов, показанных на рис. 8, производительность жидкого топлива выше, чем у газа. При низких оборотах двигателя около 2000, жидкое топливо показывает более высокую выходную мощность в сравнении с CNG. Такое же поведение мощности мы наблюдаем на пике мощности, это примерно 4000 оборотов в минуту. Исходя из экспериментальных данных показанных в таблице 4, можно сказать, что максимальная мощность для нашего двигателя составляет 2,6 кВт при 3600 об / мин. Поэтому, как показано на рисунке 8, в этом эксперименте жидкое топливо, используемое в

качестве источника энергии при 3600 об / мин, дает выходную мощность около 2,7 кВт.

Когда в качестве источника энергии использовался газ, выходная мощность двигателя при 3600 об/мин составляла всего 2,2 кВт, что показывает падение мощности силового агрегата примерно на 18,5%. Имитационная модель также была сделана, чтобы подтвердить результат для скептиков, которые отвергали падения мощности. На рисунке 8 показана штриховая линия, которой обозначен результат моделирования. Моделирование было выполнено на основе изменения параметров двигателя.

Результат моделирования показывает такие же результаты на низкой мощности. Меньшая мощность для CNG обусловлена несколькими факторами. Одним из основных факторов является объемный КПД. Объемный КПД CNG ниже, чем у жидкого топлива [2]. КПД двигателя показан на рисунке 9.

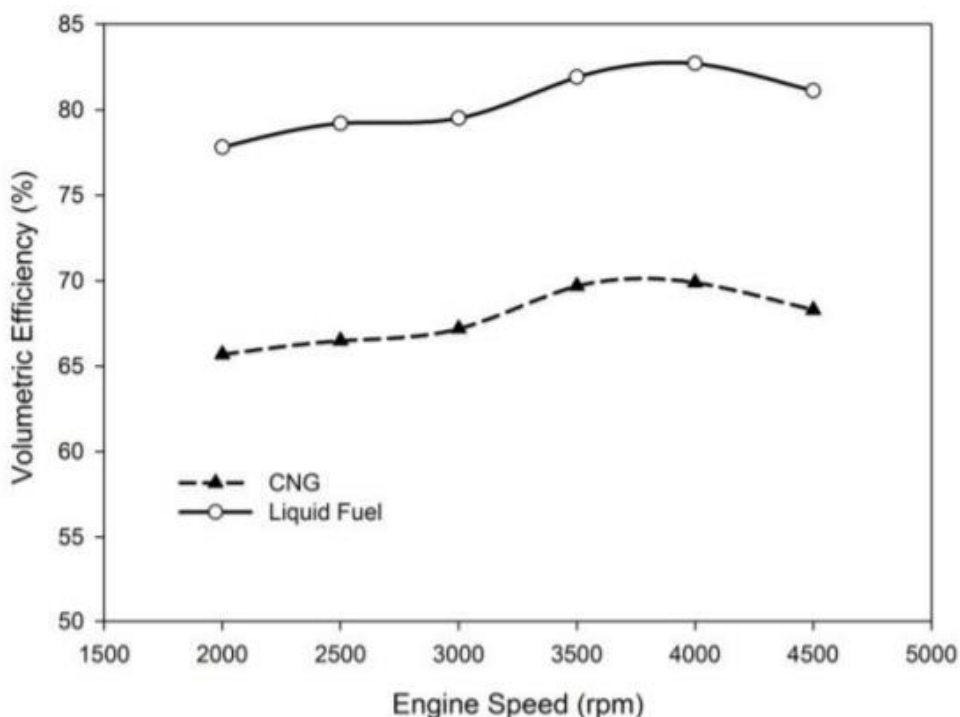


Рисунок 9 – объемный КПД.

Согласно рисунку 9, объемный КПД для этого тестового двигателя высок, когда в качестве источника энергии использовалось жидкое топливо. Однако, когда газ был пущен к двигателю, это привело к более уменьшению



КПД по сравнению с жидким топливом. Более низкий КПД обусловлен физическими свойствами газов. Во время впрыска CNG, который состоит из метана в качестве основной частицы, он не оказывает охлаждающего эффекта. Этот результат обусловлен тем, что CNG находится в газовой фазе и является паром при температуре окружающей среды.

Следовательно, без охлаждения у газа КПД становится более низким по сравнению с бензиновым топливом. На рис. 9 также показано, что максимальный объемный КПД для каждого вида топлива достигается на 3600 об / мин. Это указывает на то, что максимальная мощность также достигается, при 3600 об / мин. Из этого эксперимента следует, что максимальный КПД будет получен при максимальной выходной мощности двигателя.

Помимо объемного КПД, давление внутри цилиндра также дает различный результат для жидкого топлива и метана. Давление внутри цилиндра наблюдается на всех ступенях двигателя, но основное внимание уделяется стадии зажигания. Согласно предыдущим исследованиям, когда двигатель использовал газ в качестве источника энергии, на стадии зажигания давление внутри цилиндра ниже, чем у жидкого топлива.

На рис. 10 показано влияние CNG на давление внутри цилиндра двигателя. На основе сравнения графиков на рисунках 9 и 10 было показано, что давление внутри цилиндра с CNG-топливом ниже, чем у жидкого топлива при различных оборотах двигателя. Эта разность давлений показывает то же поведение с выходной мощностью тестируемого двигателя, где давление внутри цилиндра с газом обычно ниже, чем у жидкого топлива.

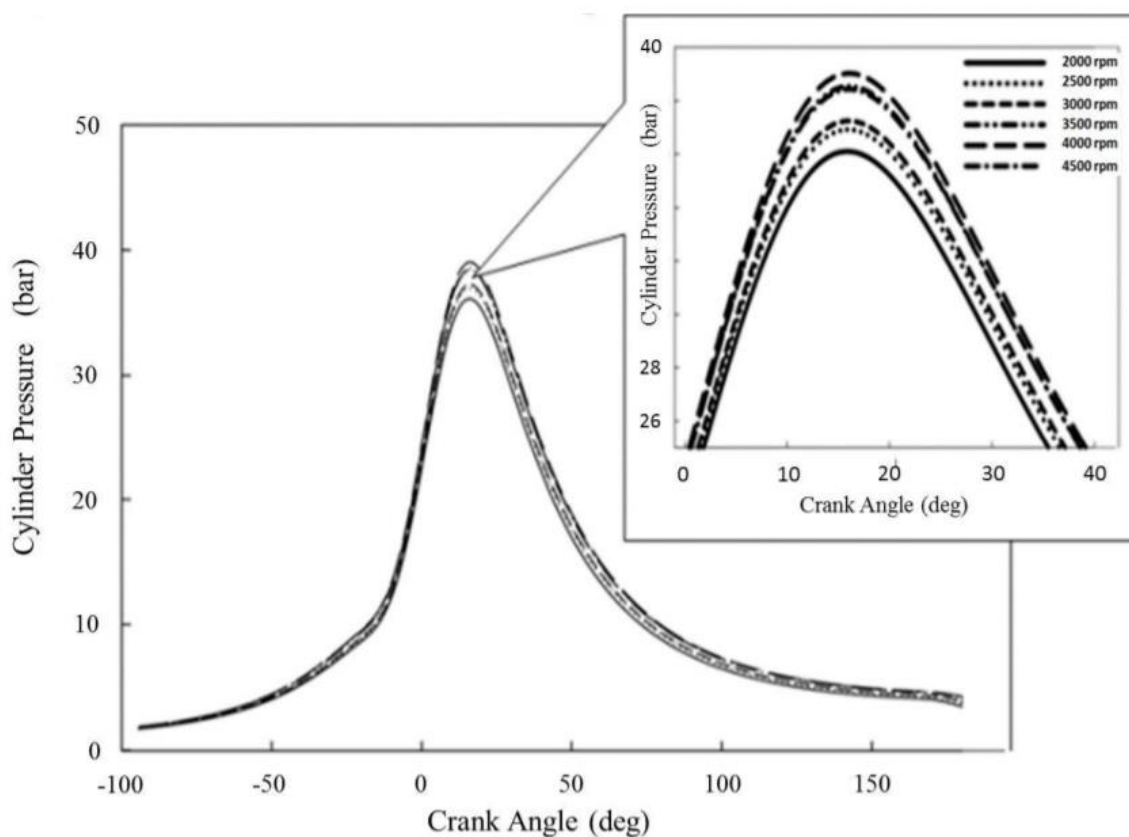


Рисунок 10 – влияние жидкого топлива на давление в цилиндре двигателя.

Давление внутри цилиндра для жидкого топлива показано на рисунке 10, а для природного газа на рисунке 11. Результаты показывают, что давление внутри цилиндра увеличивалось с увеличением частоты вращения двигателя. Различное внутреннее давление, создаваемое на стадии воспламенения между этими типами топлива, обусловлено различной плотностью и объёмным КПД. На основании таблицы 2 плотность жидкого топлива выше, чем у CNG. Плотность указывает количество или массу фракции топлива внутри камеры сгорания.

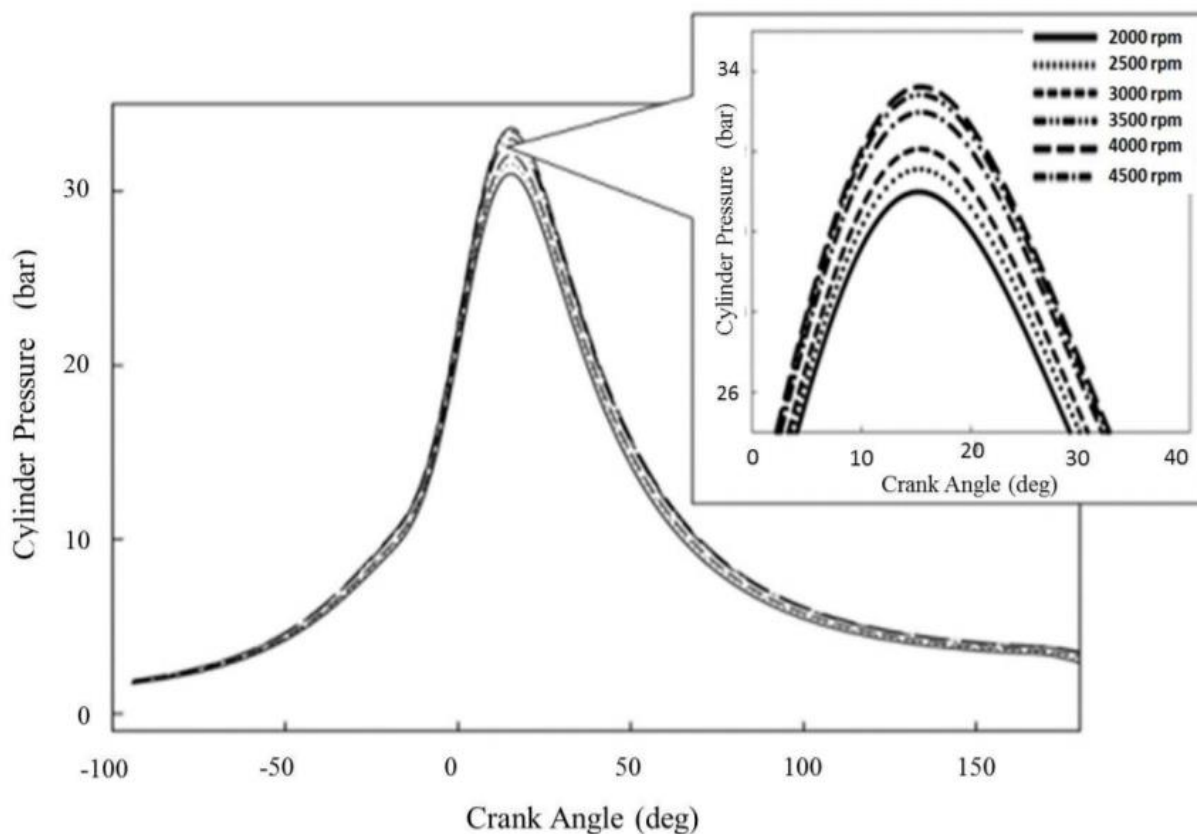


Рисунок 11 – влияние сжатого природного газа на давление в цилиндре двигателя.

Более высокая плотность будет производить большое количество сгоревшего топлива, а также создаст более высокую температуру на стадии воспламенения. Это условие объясняет, почему скорость теплопередачи жидкого топлива выше, чем у газа. Влияние CNG на скорость теплопередачи для испытуемого двигателя, показана на рисунке 13. На основании результатов, показанных на рисунках 12 и 13 оба вида топлива (жидкое топливо и CNG) показали, что скорость теплопередачи увеличилась в след за скоростью двигателя. Графики показывают, что использование жидкого топлива вызывает высокую температуру двигателя (в камере сгорания или цилиндре).

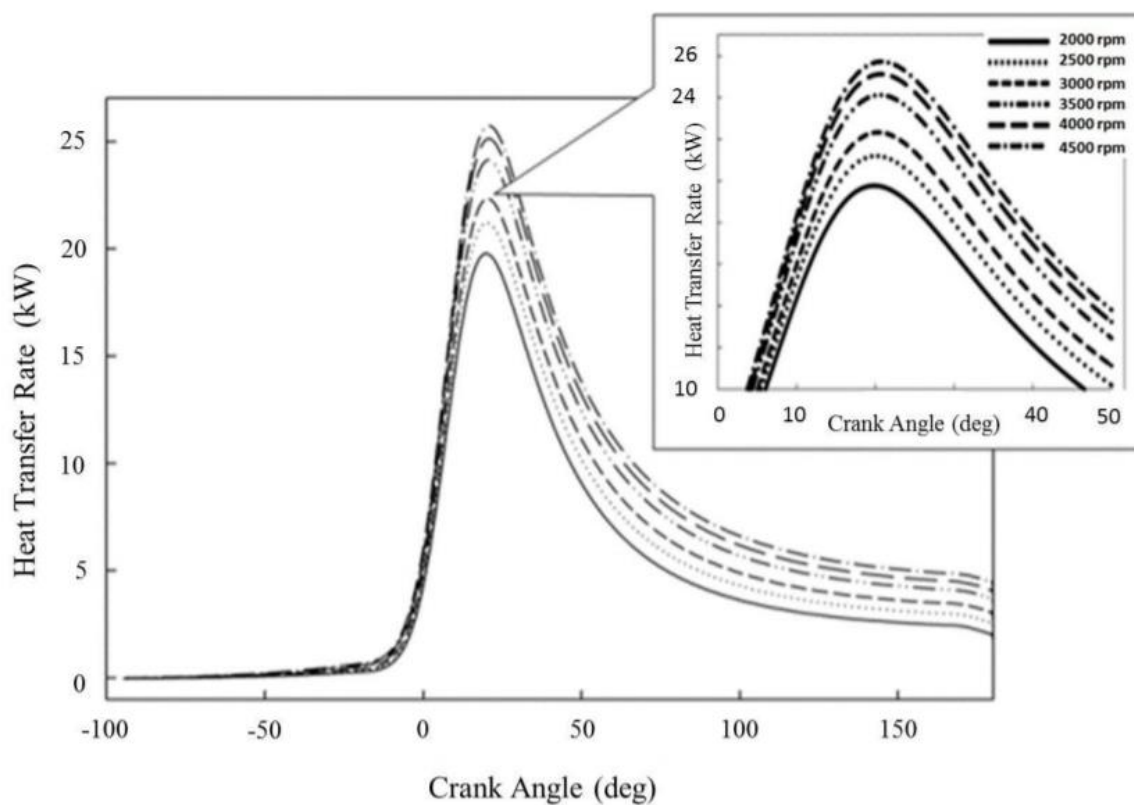


Рисунок 12 – влияние жидкого топлива на скорость теплопередачи при разных углах поворота коленчатого вала.

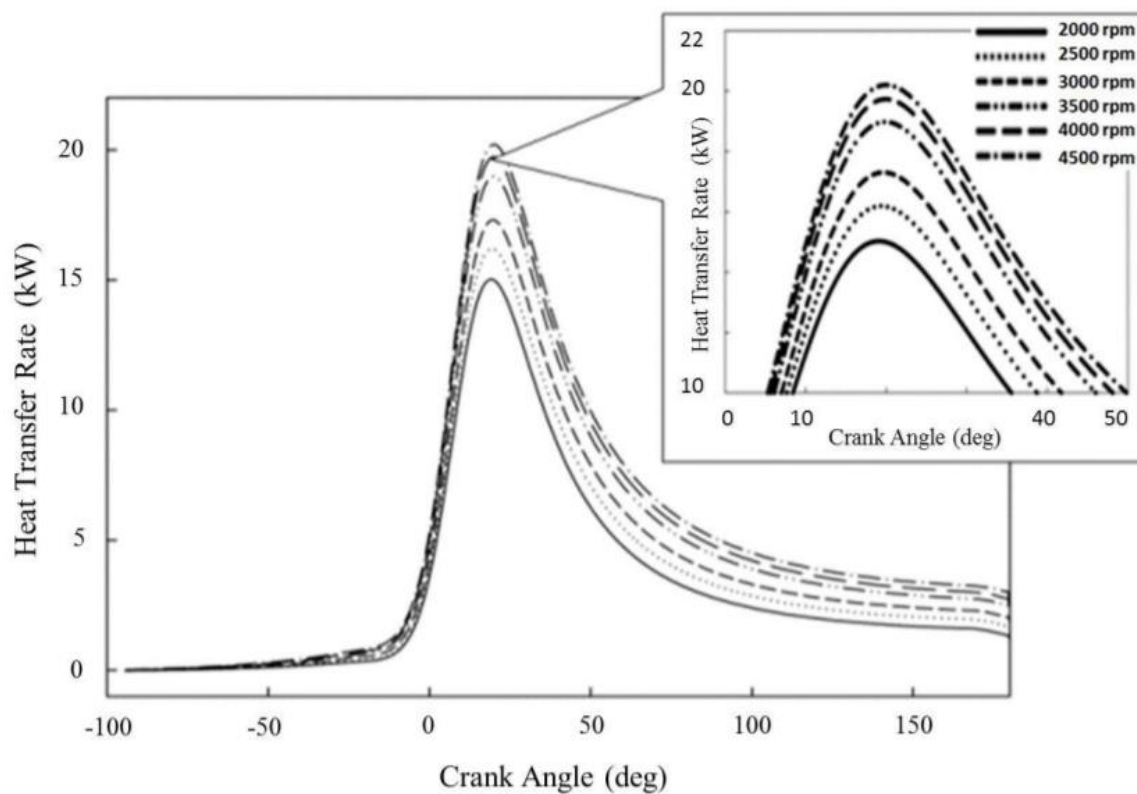


Рисунок 13 – влияние сжатого природного газа на скорость теплопередачи при разных углах поворота коленчатого вала.

Когда в качестве топлива используется газ, скорость теплопередачи снижается примерно на 5 кВт по сравнению с жидким топливом. Из рисунков 12 и 13 следует, что самая высокая скорость теплопередачи для жидкого топлива составляет 27 кВт при частоте вращения двигателя 4500 об / мин. В других случаях скорость передачи тепла при той же частоте вращения двигателя составляет всего 20 кВт для CNG.

### **2.1.3 Заключение на основе поставленного эксперимента**

В этом исследовании был выбран одноцилиндровый двигатель с искровым зажиганием для изучения влияния CNG на двигатель с искровым зажиганием. Гидравлический динамометр был использован для изучения производительности газа и жидкого топлива. Использование датчика также относится к испытанию для извлечения данных на этапе зажигания жидкого топлива и газа. Тепло, генерируемое обоими типами топлива, также было исследовано для того, чтобы определить, какое топливо вызовет более высокую теплопередачу в двигателе. Из этого исследования следует, что давление внутри цилиндра при использовании метана на 20% меньше, чем у бензина. CNG топливо также дает на 23% меньше скорости теплопередачи по сравнению с бензином. Результаты объяснили, почему газ вырабатывает на 18,5% меньше энергии по сравнению с жидким топливом (бензином). Поэтому необходимо использовать некоторые усовершенствования, чтобы использовать метан в качестве топлива.

Исходя из эксперимента, приведенного в этом исследовании, сжатый природный газ (CNG) дает низкие характеристики по сравнению с жидким топливом. Мощность сжатого газа по сравнению с жидким топливом снижается примерно до 18,5%. Основная причина отсутствия мощности при использовании газа заключается в объемном КПД. Объемный КПД газа ниже, чем у жидкого топлива, из-за его физических свойств. Когда

сравнивается результат эксперимента по давлению внутри цилиндра видно, что газ имеет более низкое давление, чем жидкое топливо на стадии воспламенения. Давление внутри цилиндра для жидкого топлива при максимальной частоте вращения двигателя (4500 об / мин) составляет около 40 бар, а для сжатого природного газа при той же частоте вращения двигателя давление внутри цилиндра составляет всего 32 бар. Более низкое давление, получаемое с при сгорании газа, обусловлено низкой плотностью самого вещества по сравнению с жидким топливом. Плотность также приводит к низкому тепловыделению, генерируемому газом. Низкое тепловыделение основано на температуре во время сгорания. Скорость теплопередачи к стенке при использовании газа также ниже по сравнению с жидким топливом. В эксперименте скорость теплопередачи газового вещества при 4500 об / мин составляет 20 кВт. Однако скорость теплопередачи на жидком топливе выше (26 кВт) при той же частоте вращения двигателя. Следовательно, КПД газа ниже, чем у жидкого топлива, но с точки зрения генерируемого тепла CNG дает больший срок службы двигателя из-за низкой скорости теплопередачи к стенкам. Для увеличения мощности двигателя на сжатом природном газе разрабатывается возможность использования предварительной камеры сгорания и системы прямого впрыска для увеличения выработки энергии разрабатывается возможность использования предварительной камеры сгорания и системы прямого впрыска для увеличения выработки энергии.

## **2.2 Исследование мощности двигателя на основе 1,7 литрового турбированного двигателя**

В этой работе исследуется потенциал комбинированного впрыска сжатого природного газа и бензина на основе 1,7-литрового турбированного двигателя с турбонаддувом и наилучшая рабочая характеристика двигателя для лучшей эффективности преобразования каталитических нейтрализаторов. Сжатый природный газ (CNG) в качестве альтернативного

топлива используется в двигателях с искровым зажиганием для улучшения расхода топлива и уменьшения выхлопных газов. Улучшения дали больше преимуществ в выбросах, но это снизило производительность двигателя. Метан имеет более высокое октановое число и сопротивление детонации, чем бензин, и, следовательно, двигатели, предназначенные для работы на природном газе, могут иметь более высокие степени сжатия и, следовательно, более высокие показатели эффективности. Двухтопливный двигатель с турбонаддувом — это новая концепция, которая предлагает взять преимущества от двигателя, работающего на метане и избавиться от его недостатков. Данное исследование открывает очень интересные перспективы для удовлетворения будущих норм по выбросам с использованием только трехкомпонентного катализатора, поскольку стехиометрическое условие сгорания поддерживается во всем рабочем диапазоне двигателя.

### **2.2.1 Общая информация о двухтопливном турбированном двигателе**

Сжатый природный газ (CNG) является альтернативным топливом, которое можно использовать в качестве замены бензина, дизельного топлива или пропана. Это альтернативное топливо имеет много преимуществ в борьбе с загрязнением окружающей среды и воздуха [1]. Он считается экологически чистой альтернативой этим видам топлива и намного безопаснее в случае утечки топлива. Природный газ легче воздуха, поэтому при утечке или разливе быстро рассеивается [2]. Использование полного потенциала природного газа в качестве альтернативного топлива является средством снижения выбросов выхлопных газов. Это делается путем сжатия природного газа (в основном, метана) [3]. Было установлено, что двигатели, работающие на CNG, с точным контролем соотношения  $A / F$  и специальными катализаторами для выхлопных газов, выполнили калифорнийские нормы выхлопа SULEV1 [4]. Преимущества метана в качестве топлива уже были отмечены рядом исследований; Сжатый

природный газ как интересная альтернатива жидкому ископаемому топливу снижает выбросы CO<sub>2</sub> и обеспечивает чистоту источников энергии для транспорта [5, 6].

Недостатком использования природного газа в двигателях является его более низкая скорость пламени, что приводит к повышению температуры внутренних компонентов двигателя. Кроме того, низкий объемный КПД и плотность энергии газа снижает выходной крутящий момент двигателя в безнаддувных двигателях [4].

Уже имеющиеся на рынке двухтопливные двигатели с искровым зажиганием оснащены независимыми системами впрыска газа и жидкого топлива. Они могут работать с газом или жидким топливом, но они не в полной мере используют потенциал каждого топлива. Об этой новой стратегии впрыска было сообщено еще в начале 2000-х годов она состоит из впрыска газообразного топлива, имеющего высокое октановое число, и жидкого топлива, бензина с высокой удельной энергией, чтобы получить большое количество преимуществ обоих видов топлива.

Двигатель с турбонаддувом производит большую мощность, чем тот же безнаддувный двигатель. Это может значительно улучшить отношение мощности к весу двигателя. Турбина извлекает потраченную кинетическую и тепловую энергию из высокотемпературного потока выхлопных газов и вырабатывает энергию для привода компрессора за счет небольшого увеличения потерь при перекачке. Кроме того, использование сжатого природного газа в двигателе с турбонаддувом с искровым зажиганием имеет и другие преимущества, такие как высокое сопротивление детонации и более высокая удельная выходная мощность. С другой стороны, по сравнению с бензиновым двигателем, для безнаддувных двигателей, работающих на метане, объемный КПД уменьшается примерно на 4–10% из-за его более низкой удельной энергии, что снижает выходной крутящий момент двигателя. Кроме того, вероятность образования отложений на поверхности впускных клапанов выше, поскольку эффект очистки бензина отсутствует.



Более низкая скорость пламени также приводит к повышению температуры внутренних компонентов двигателя.

Ученые из общества SAE исследовали комбинированный впрыск бензина и газа в двигатель с искровым зажиганием без наддува с впрыском топлива во впускной коллектор. Они изучили тенденцию к детонации смешанного топлива и пришли к выводу, что она ниже, чем для бензина, и время зажигания меньше. Усовершенствованные параметры зажигания и стехиометрическое соотношение воздуха и топлива приводят к повышению тепловой эффективности примерно на 10–27% по сравнению с бензиновым двигателем.

Также во многих работах были сделаны исследования на основе эффекта комбинированного впрыска бензина и метана в турбированный двигатель с искровым зажиганием и впрыском бензина и метана во впускной коллектор. Они увеличили степень сжатия базового двигателя с 9,5 до 11,5. Был сделан вывод о том, что из-за более высокой термической и объемной эффективности по отношению к бензину и метану, крутящий момент двигателя увеличился при комбинированном впрыске. Далее был исследован эффект смешанного впрыска бензина и CNG в двигателе с искровым зажиганием и турбонаддувом, с непосредственным впрыском бензина внутрь цилиндра и впускным отверстием для впрыска метана во впускной коллектор. Данная методика укрепила седла клапанов для предотвращения эрозии при высоких тепловых нагрузках. Исследователи пришли к выводу, что при комбинированном впрыске бензина и газа крутящий момент на выходе двигателя выше, чем в обычном бензиновом двигателе.

Momeni Movahed [41] провел экспериментальное исследование на двигателе с турбонаддувом. Он указал некоторые проблемы двигателя при работе на бензине, такие как задержка зажигания для предотвращения детонации и богатая топливно-воздушная смесь для защиты компонентов, эти проблемы могут быть решены с помощью комбинированного впрыска бензина и сжатого природного газа. Результаты эксперимента показывают,

что комбинированный впрыск повышает тепловую эффективность по сравнению с бензиновым режимом. С другой стороны, некоторые проблемы двигателя, работающего на сжатом природном газе такие как высокое давление в цилиндре и потеря тепла в охлаждающей жидкости двигателя, могут быть решены при одновременном впрыске бензина и CNG.

Dashti и другие участники эксперимента [42] провели моделирование термодинамического цикла обычного четырехтактного двигателя с использованием бензина и метана, для определения характеристик двигателя и его выбросов. Первый закон термодинамики был применен для определения температуры и давления в цилиндрах как функции угла поворота коленчатого вала. Результаты этой работы были оценены с использованием соответствующих экспериментальных данных существующего двигателя СИ, работающего как на бензине, так и на метане. Результаты показали, что мощность двигателя, работающего на метане, ниже, чем у двигателя, работающего на бензине, примерно на 11% в диапазоне скоростей 1500–4000 об / мин из-за более высокой объемной эффективности. В среднем, когда двигатель работает на сжиженном природном газе, ISFC снижается примерно на 16% в этом диапазоне скоростей. Однако для этого диапазона оборотов двигателя удельные выбросы CO<sub>2</sub>, CO и концентрация УНС значительно снижаются примерно на 33%, 60% и 53% соответственно, а концентрация NO увеличивается на 50%.

Ученые из Калифорнии [43,44] проводили эксперименты для бинарных смесей метан/изооктан и сжатый природный газ/изооктан. В этом исследовании метан (основной компонент CNG) был добавлен в двух объемных фракциях 30% и 70% к изооктану (типичное топливо бензина). Результаты показали, что добавление метана к изооктану увеличивает скорость нерастянутого распространения в обедненной смеси, но снижает скорость нерастянутого распространения в богатой смеси.

Недавние исследования доказывают, что сопутствующий впрыск газа и жидкого топлива в двигатели с искровым зажиганием может привести к

сильному взаимодействию между двумя видами топлива. Тем не менее, в этих исследованиях основное внимание было уделено производительности, крутящему моменту и тепловой эффективности двигателей. В данном моделировании исследуется возможность одновременного впрыска метана и бензина в четырехцилиндровый двигатель с турбонаддувом объемом 1,7 л. Основное внимание в этом исследовании уделяется поиску наилучшей точки для производительности двигателя, а также уменьшения выбросов и эффективности конверсии катализатора.

Компромисс между характеристиками двигателя и загрязнением окружающей среды важен, поскольку в автомобильной промышленности циклы разработки постоянно сокращаются, а руководящие принципы законодательства, касающиеся предельных значений выбросов загрязняющих веществ, становятся более жесткими. Законодательно установленные пределы выбросов могут быть достигнуты только путем оптимизации системы выхлопных газов.

### **2.2.2 Экспериментальная установка**

Двигатель, использованный в этом исследовании, представляет собой четырехцилиндровый двигатель с четырьмя клапанами на цилиндр с турбонаддувом объемом 1,7 л и безвозвратной топливопроводом. На рисунке 14 показана схема соединений различных компонентов, используемых в двигателе, и различных функций управления.

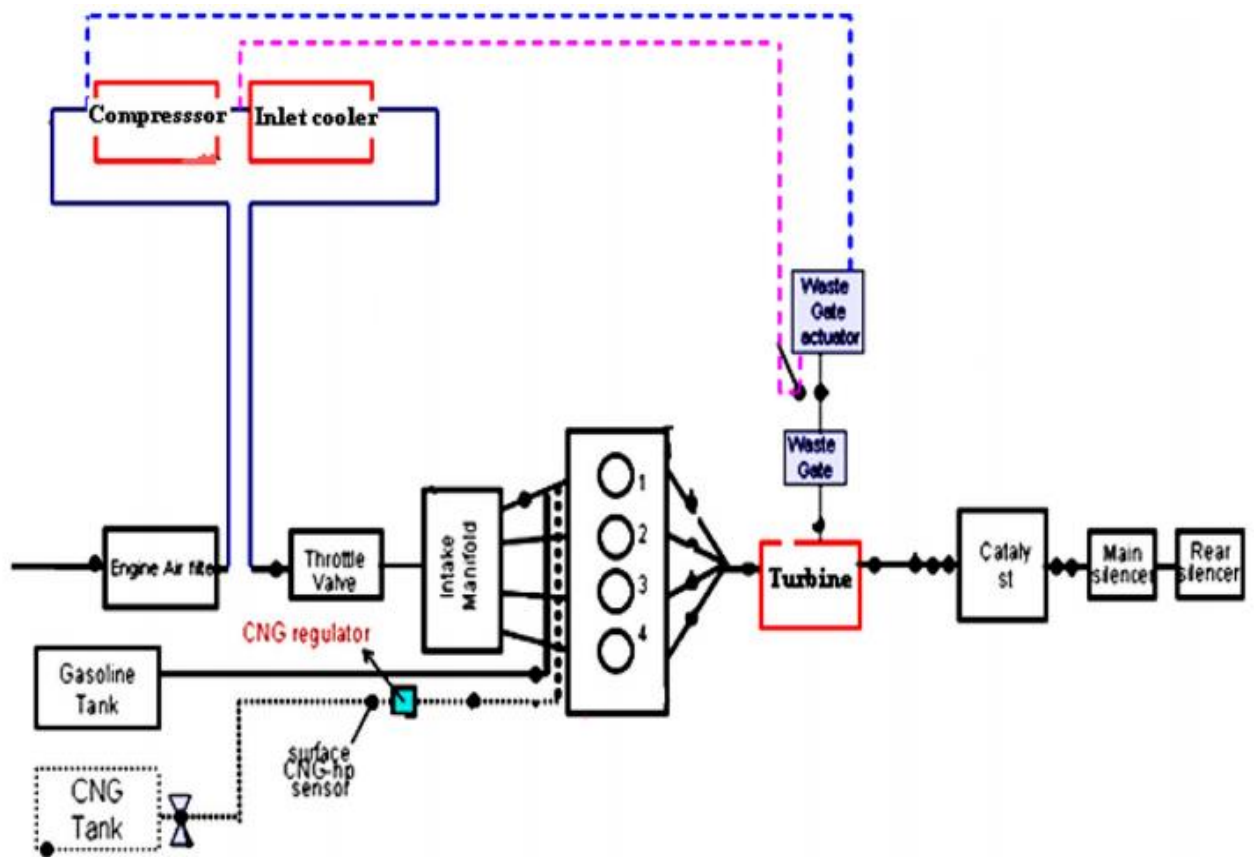


Рисунок 14 – принципиальная схема двухтопливного двигателя с турбонаддувом и связанных с ним устройств управления.

В таблице 4 указаны технические характеристики двигателя, который использовался для испытаний.

Таблица 4 – технические характеристики двигателя 1,7л.

Параметры двигателя	
Тип двигателя	Турбированный
Диаметр поршня	78,6 мм
Ход поршня	85 мм
Объем	1650 см <sup>3</sup>
Максимальная мощность	110 кВт
Максимальная обороты двигателя	5500 об/мин
Максимальный крутящий момент	215 Нм
Обороты двигателя при	2200-4800 об/мин

максимальном крутящем моменте	
Тип компрессора	Центробежный компрессор
Турбина	Одна

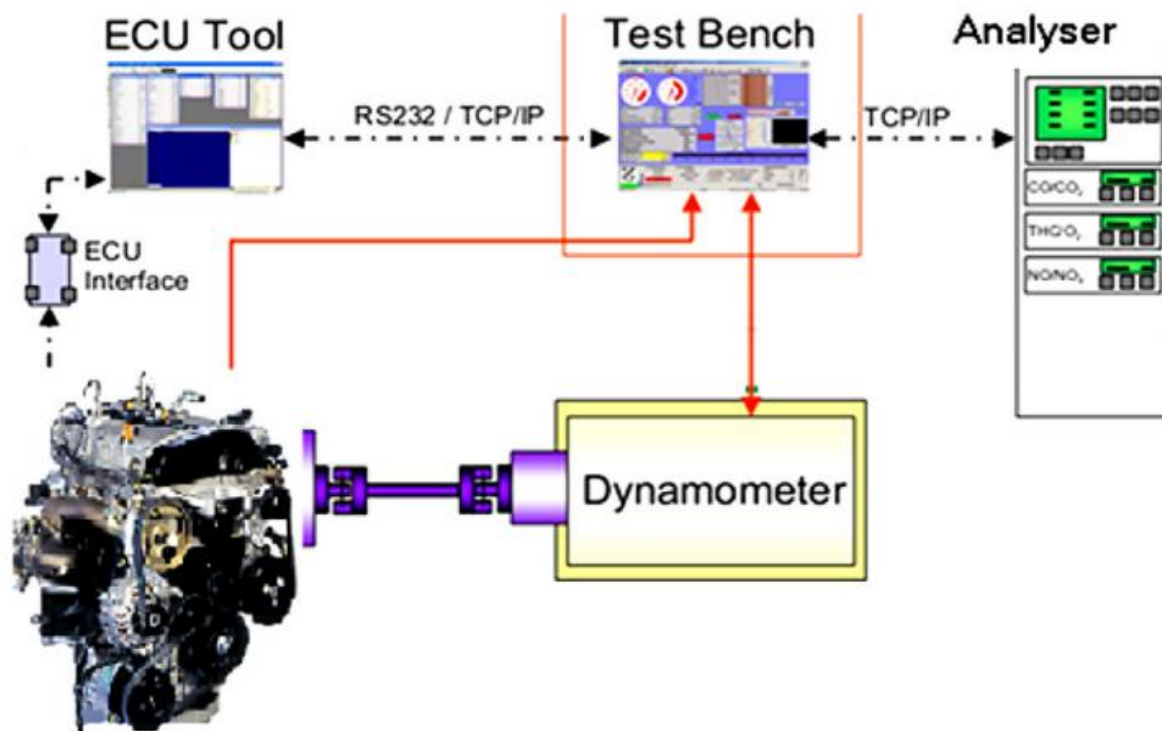


Рисунок 15 – принципиальная схема двигателя и экспериментальная настройка устройств управления.

Двигатель соединен с вихретоковым динамометром AVL типа АРА 1F4-E-0509 с максимальной мощностью 120 кВт и максимальной скоростью 8000 об / мин. Принципиальная схема двигателя и различных управляющих устройств испытательной установки показана на рис. 2. Сбор данных о двигателе осуществляется с помощью инструментов ЭБУ и мониторинга на испытательном стенде. Программное обеспечение INCA2 использовалось для одновременной записи и анализа измеренных данных от блока управления и двигателя. Программа помогает определять измеренные данные двигателя, такие как лямбда, различные температуры и значения напряжения и т. Д. Система контроля на испытательном стенде имеет важное значение для

управления различными необходимыми параметрами двигателя, такими как температура охлаждения, давление и температура масла, подача топлива, впускной воздух и выхлопные газы, характеристики потока.

Двигатель, по существу, управляется блоком управления (ECU) изготовителя оригинального оборудования (OEM). ECU модулирует соотношение воздух / топливо около стехиометрического коэффициента при определенной частоте и амплитуде на основе обратной связи от датчика кислорода в выхлопных газах (HEGO). Входящий воздух смешивается бензином и метаном с желаемым соотношением воздух / топливо и массовой долей сжатого природного газа. При сгорании смеси образуются выхлопные газы с высоким давлением и температурой, поступают в турбину. Скорость вращения турбины контролируется отводным затвором, который позволяет отводить выхлопные газ из турбины.

В таблице 5 приведены технические характеристики динамометра и измерительных приборов теста. Расход КПП измеряют с помощью массового расходомера Emerson CMF010 типа Кориолиса. Давления в цилиндрах измеряются и регистрируются во всех цилиндрах с помощью четырех датчиков давления AVL GH12D. Важные выбросы выхлопных газов измеряются с помощью анализаторов Horiba MEXA-7000.

Таблица 5 – спецификация динамометра и испытательных приборов.

1. Dynamometer							
Dyno. type	Max torque (Nm)		Max speed (rpm)		Max power (kW)	Inertia (kg m <sup>2</sup> )	Weight (kg)
AVL APA 1F4-E-0509	509		8000		120	0.35	600
2. Fuel temperature control							
Model	Stability (°C)		Fuel temp. outlet (°C)		Fuel temp. inlet (°C)	Ambient temp. (°C)	
AVL 753C	Better than 0.02		10–80		–8 to +70	5–50	
3. CNG consumption measuring device							
Model	Fuel type	Transmitter	Nominal flow (kg/h)	Maximum flow (kg/h)	Zero stability (kg/h)	Density accuracy (kg/m <sup>3</sup> )	Temp. accuracy (C)
Emerson CMF010	Liquid	1700/2700	0–82	108	0.002	2	1 + 0.5%
Emerson CMF010	Gas	1700/2701	0–32	65	0.002	–	1 + 0.5%
4. AFR analyzer device							
Model	Measuring	Impedance (Ω)		Ambient temp. (°C)		Humidity (%)	Gas temp. (°C)
IPCO DHBS102	0.7–1.4	0–174		5–45		less than 80	–7 to 900

## 2.2.3 Процедура тестирования

### 2.2.3.1 Тесты производительности бензина и сжатого природного газа

Чтобы сравнить характеристики двигателя в режимах бензина и сжатого природного газа, проводятся тесты с полной нагрузкой при различных оборотах двигателя. В первой части этого исследования результаты испытаний исследуются в режимах, предназначенных для бензина и метана. Результаты показаны на рисунке 16. На этом рисунке показаны среднее эффективное давление (BMEP) и удельный расход топлива (BSFC) двигателя для бензина и природного газа при скорости от 1000 до 5500 об / мин. Значения BSFC рассчитываются по формуле:

$$BSFC \left( \frac{g}{kw \cdot h} \right) = 1000x \frac{m_{gasoline+m_{CNG}} \cdot \frac{LHV_{CNG}}{LHV_{Gasoline}}}{Engine\ power} \quad (2)$$

Низшая теплотворная способность (LHV) всего топлива, вводимого в камеру сгорания (смесь бензина и газа), рассчитывалась линейно из измерений массового расхода каждого отдельного топлива. В таблице 6 приведены технические характеристики сжатого природного газа, измеренные в соответствии со стандартом ASTM.

Таблица 6 – характеристики сжатого природного газа.

Sample identification: <i>P</i> : 2500 psig, <i>T</i> : °C			
No.	Component	Test method	Result
1	H <sub>2</sub> S	ASTM D 5504	1.6 ppm
2	N <sub>2</sub>	ASTM D 1945	3.9 mol%
3	C <sub>1</sub>	ASTM D 1945	89.6 mol%
4	CO <sub>2</sub>	ASTM D 1945	1.0 mol%
5	C <sub>2</sub>	ASTM D 1945	3.6 mol%
6	C <sub>3</sub>	ASTM D 1945	1.12 mol%
7	IC <sub>4</sub>	ASTM D 1945	0.24 mol%
8	NC <sub>4</sub>	ASTM D 1945	0.31 mol%
9	IC <sub>5</sub>	ASTM D 1945	0.10 mol%
10	NC <sub>5</sub>	ASTM D 1945	0.07 mol%
11	C <sub>6</sub>	ASTM D 1945	0.04 mol%
12	C <sub>7</sub>	ASTM D 1945	0.02 mol%
Total			100.0
			Results
Calculated average molecular weight (g/mol)			17.99
Calculate gas specific gravity, air = 1.000 (M. weight of air = 28.964 g/mol)			0.621
Calculate gas density in Kg/m <sup>3</sup> ( <i>P</i> = 1013.25 mbar, <i>T</i> = 15 °C)			0.761
Calculate net calorific value ( <i>P</i> = 1013.25 mbar, <i>T</i> = 15 °C)			
MJ/m <sup>3</sup>			34.53
Btu/ft <sup>3</sup>			922.7
Calculate gross calorific value ( <i>P</i> = 1013.25 mbar, <i>T</i> = 15 °C)			
MJ/m <sup>3</sup>			38.27
Btu/ft <sup>3</sup>			1022.5



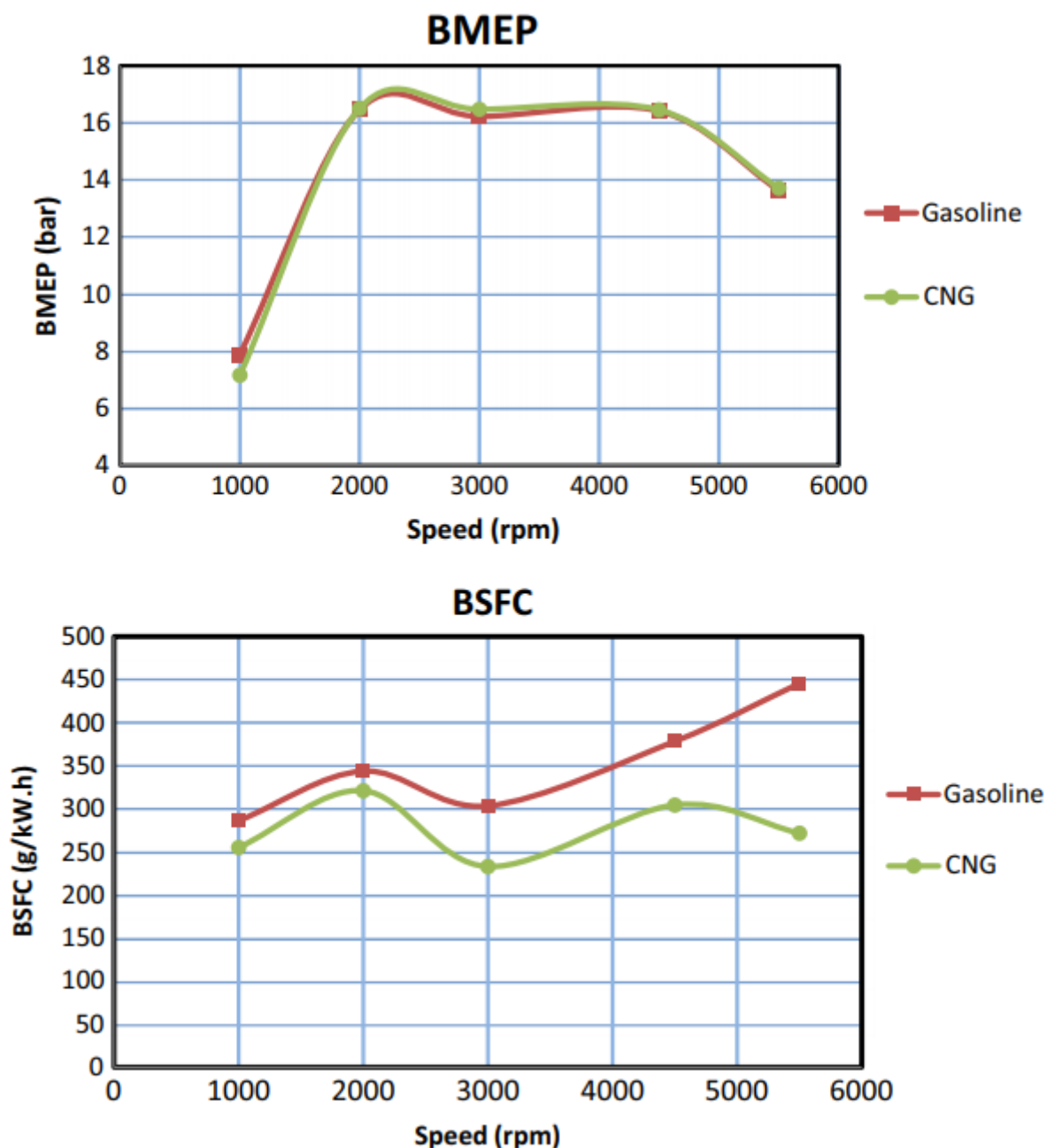


Рисунок 16 – Графики характеристик среднего эффективного давления (BMEP) и удельного расхода топлива (BSFC) в зависимости от оборотов двигателя.

Обычно среднее эффективное давление у сжатого природного газа на 4–14% меньше, чем у бензина на всех оборотах двигателя. Это связано с более низкой скоростью воспламенения газа по сравнению с бензином. В результате большая часть негативной работы обнаруживается в работе CNG. Чтобы решить эту проблему, для работы двигателя с природным газом

можно использовать опережающее зажигание, потому что в режиме использования газа сопротивление детонации у CNG намного выше, чем у бензина.

Кроме того, вытеснение воздуха сжатым природным газом в цилиндре снижает объемную эффективность и, как следствие, приводит к потере эффективного давления. В случае использования метана мощность будет уменьшаться, но среднее эффективное давление, которое является показателем мощности двигателя, было одинаковым на всех скоростных режимах, это показано на рисунке 16.

В среднем природный газ производит на 10% меньше указанной мощности и указанного крутящего момента по сравнению с бензином. Это происходит главным образом из-за более низкой энергии заряда газового топлива, что снижает объемную эффективность двигателя во время индукционного хода. Более значительное снижение мощности при использовании газа было обнаружено при более высокой частоте вращения двигателя из-за низкой скорости пламени CNG по сравнению с бензином.

Скорректированное поведение удельного расхода топлива BSFC при различных оборотах двигателя показано на рисунке 16. В результате расход газа на 11–39% ниже, чем бензина. Минимальные значения BSFC для бензина и сжатого природного газа составляют 300 и 235 г / кВт ч при 3000 об/мин. Это может быть объяснено тем фактом, что теплотворная способность CNG на 12% выше, чем у бензина, и он вырабатывает сопоставимую, но более низкую указанную выходную мощность, поэтому двигатель на метане потребляет меньше энергии на единицу произведенной мощности по сравнению с бензином при той же работе двигателя. На рисунке также показано, что минимальный удельный расход топлива происходит при средних оборотах двигателя. На низких оборотах двигателя значения BSFC

выше из-за более высокой теплопередачи. При высоких оборотах двигателя значения расхода топлива выше из-за более высокого трения двигателя.

При оборотах более 4500 об/мин видно, что удельный расхода топлива сжатого природного газа снизился. Причина в том, что когда двигатель работает сжатым газе, смесь может быть более обедненной из-за более высокого сопротивления детонации газа, в то время как для бензина топливо будет богатым, чтобы защитить двигатель от детонации и более высокой температуры выхлопных газов.

Выбросы отработавших газов HC, CO и NOx для обоих видов топлива представлены на рисунке 17. Результаты показывают, что газ производит меньше несгоревших углеводородов во всем диапазоне скоростей по сравнению с бензином. Выброс углеводородов значительно снижается на 25–72% при работе двигателя на сжатом природном газе благодаря более полному сгоранию газа по сравнению с бензином. Кроме того, эксплуатация автомобилей на сжатом природном газе показывает значительно более низкую эмиссию CO. Было обнаружено, что CNG дает на 30–91% меньше CO, что является результатом неполного сгорания в двигателе и генерируется, когда двигатель работает с богатой смесью или когда не достигается правильное смешивание топливо-воздушной смеси (ТВС). Ожидается, что с высоким отношением водорода к углероду и его более простой химической структурой, CNG (преимущественно CH<sub>4</sub>) производит меньше CO, чем бензин. Выброс NOx как для бензина, так и для газа показан на рисунке 17. Результат показывает, что сжатый газ дает более высокие выбросы NOx, особенно при более высоких оборотах двигателя, из-за более высокой температуры цилиндра двигателя, образующейся в результате сгорания топлива, и более низкого содержания воздушного топлива. Это означает, что при работе на природном газе мы имеем более высокое качество защиты от детонации, поэтому он может поддерживать температуру выхлопных газов ниже, следовательно не нужно менять угол опережения

зажигания, чтобы избежать детонации. В результате этого не нужно обогащать смесь и можно поддерживать стехиометрию.

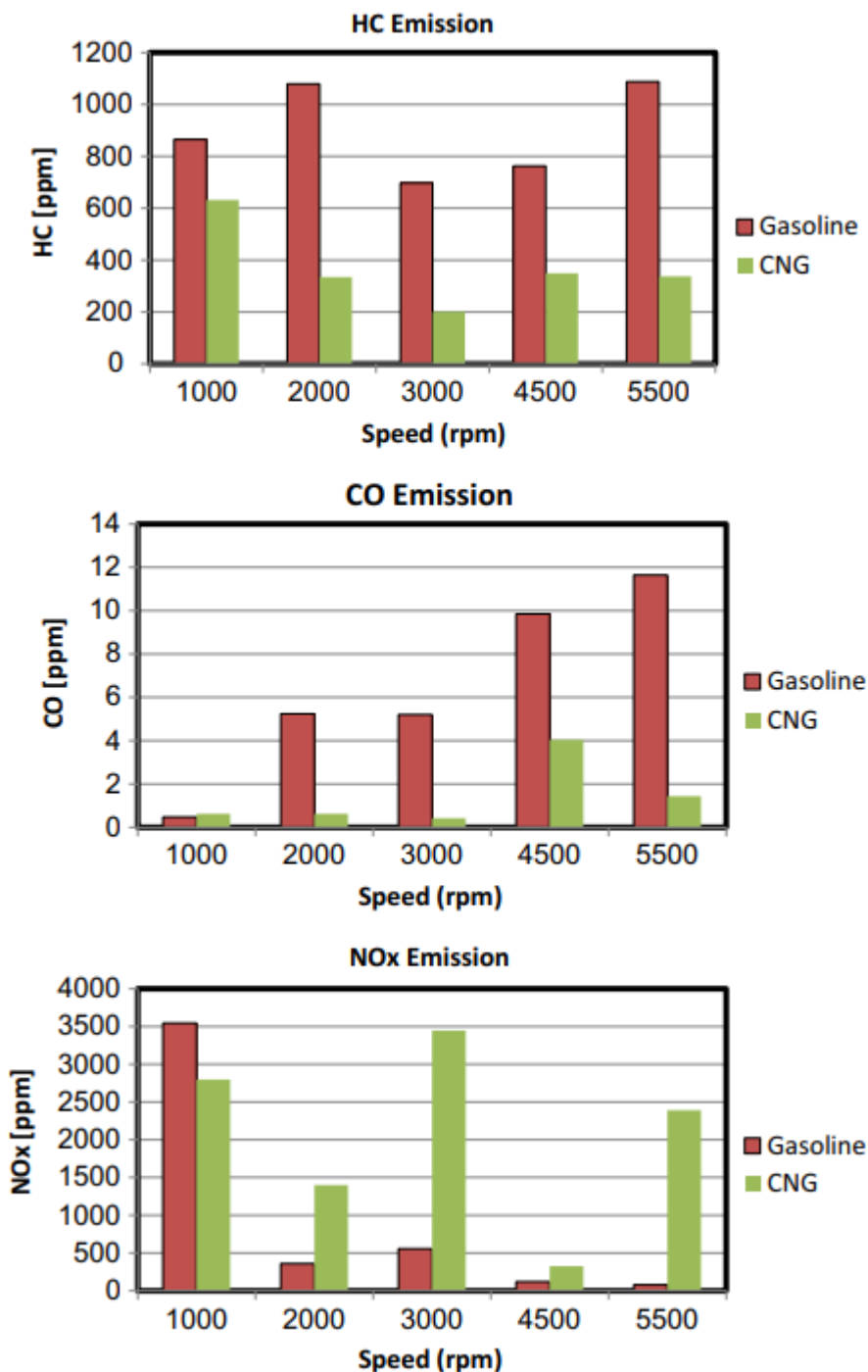


Рисунок 17 – графики выбросов HC, CO и NOx в зависимости от оборотов двигателя.

### 2.2.3.2 Тестирование смеси сжатого природного газа и бензина

Во второй части экспериментального анализа проводится несколько испытаний с комбинированным впрыском бензина и CNG. Эти испытания проводятся на разных оборотах двигателя и в условиях полной нагрузки, с разными массовыми долями природного газа. Данный эксперимент сделан при частоте вращения двигателя (3000 об/мин), при которой вырабатывается максимальный крутящий момент. Результаты этого эксперимента показаны на рисунках 18 и 19.

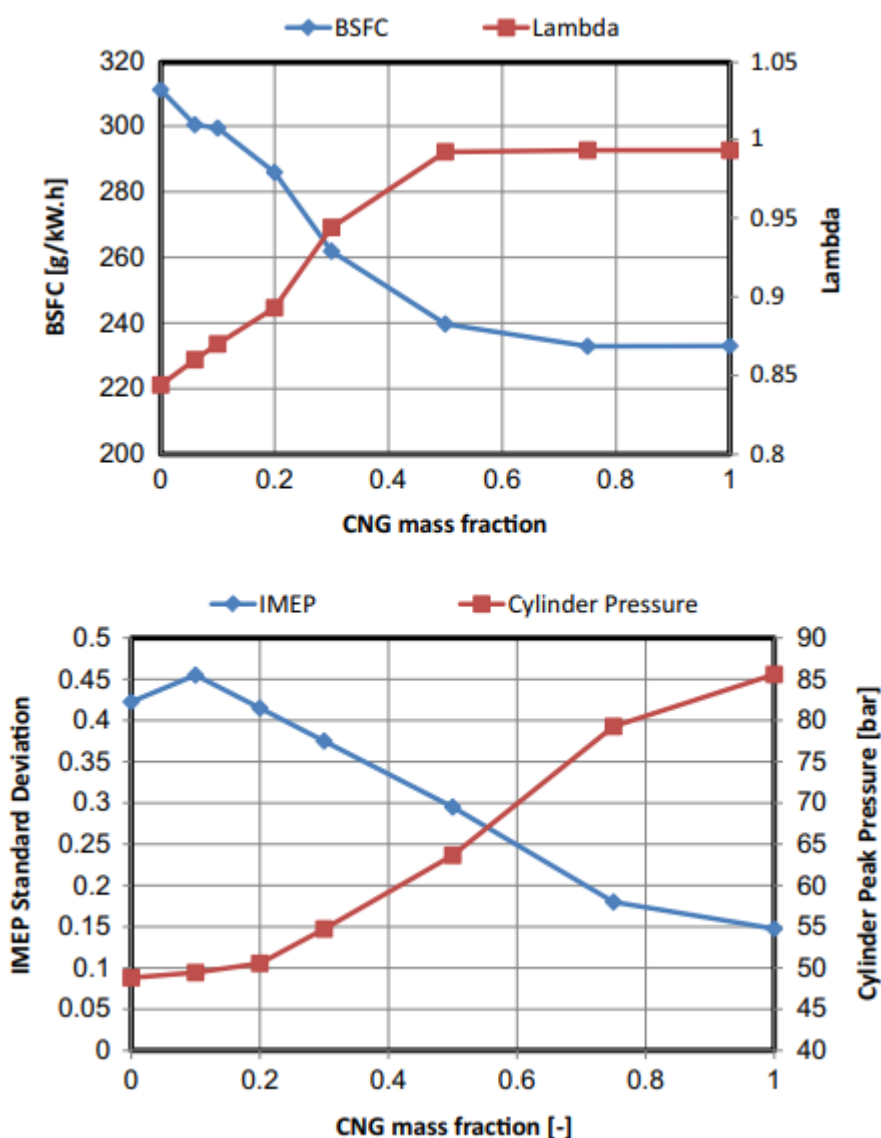


Рисунок 18 – Результаты эксперимента при комбинировании бензина и газа.

Из-за механических ограничений двигателя максимально допустимая мощность была ограничена. При 20% массовой доли газа уже достигается эта величина мощности. Следовательно, при более высоких массовых долях газа в топливовоздушной смеси, это может привести к экономии расхода топлива и снижению выбросов. Кривая удельного расхода топлива и лямбды в зависимости от массовой доли газа показаны на рисунке 18. Сравнение рисунком 16 показывает, что удельный расход топлива (BSFC) с массовой долей газ в 10% равна режиму бензина. Причины этого - более низкая разница во времени зажигания и равная лямбда для этих двух точек, а также более высокая скорость воздушного потока. На рисунке 18, можно видеть, что при увеличении массовой доли сжатого природного газа стандартное отклонение среднего эффективного давления (IMEP) уменьшается из-за более низкой теплотворной способности CNG. Кроме того, лямбда-кривая показывает, что добавление природного газа используется для приведения двигателя в стехиометрическое рабочее состояние. Если бы не газ, то в противном случае он работал бы с использованием обогащения, если бы использовался только бензин. Это происходит по мере добавления газа, который повышает общее качество топлива, предотвращающее детонацию, и, следовательно, обогащение ТВС не требуется.

Процесс сгорания в двигателе не повторяется от цикла к циклу. Полученное пиковое давление может изменяться на 30% от цикла к циклу в нормально работающем двигателе. Циклические колебания в сгорании могут быть приписаны межцикловым изменениям любого из параметров, которые, как известно, влияют на сгорание. Массовая доля остаточных газов, уровень турбулентности и неоднородность ТВС (капли в смеси) являются основными параметрами, влияющими на начальный рост ядра пламени, что в конечном итоге приводит к изменению горения в различных циклах. Увеличивая количество сжатого природного газа в смешанном топливе, можно увеличить

угол опережение зажигания. Следовательно, пиковое давление имеет тенденцию к увеличению, как показано на рисунке 18.

Массовая доля остаточного газа уменьшается с увеличением давления, и однородность смеси улучшается при более высокой концентрации сжатого газа в смеси. Для достижения постоянной мощности, максимальное давление в цилиндре должно быть увеличено за счет увеличения искры и увеличения заряда.

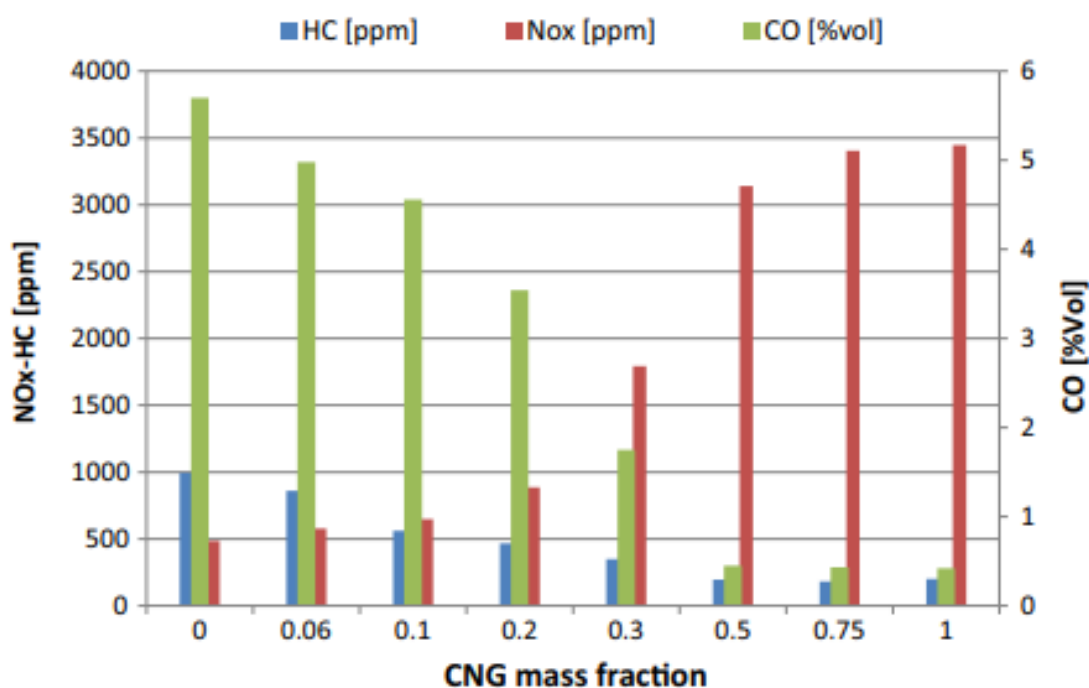


Рисунок 19 – эмиссия двигателя при разных режимах работы с комбинированным топливом.

На рисунке 19 показан результат измерения выбросов при работе двигателя на комбинированном топливе. Результаты показывают, что с увеличением массовой доли CNG выбросы HC и CO уменьшаются, а выбросы NOx увеличиваются. Причина в том, что газ имеет разные составы и, как обсуждалось ранее, ведет себя не так, как бензин. Увеличение времени зажигания и сближение со стехиометрическим коэффициентом топливно-воздушной смеси приводит к увеличению выбросов NOx в более высокой

массовой доле газа в смеси. Следовательно, максимальная температура цилиндра будет увеличиваться, и из-за большого содержания кислорода в продуктах сгорания увеличивается образование NOx.

Из результатов эксперимента, представленного на рисунке 19, видно, что уменьшения количества отработавших газов достигается при массовой доле смеси с 20–30% содержанием сжатого природного газа.

Выбросы твердых частиц углеводородов (НС) и углекислого газа (СО) очень высоки для метана только из-за высокого ограничения на поступление топлива из-за высокой очистки. При добавлении бензина продолжительность впрыска газа уменьшается, что снижает ограничение на поступление топлива. Эмиссия была минимальной при массовой доле сжатого природного газа в 30%, потому что вся газовая фракция могла попасть в цилиндры. По сравнению с рисунком 17 при 3000 об / мин выбросы НС и СО составляют примерно половину от режима только для бензина, а выбросы NOx выросли в три раза.

На самом деле, весьма вероятно, что при комбинированном впрыскивании смесь метана, бензина и воздух имеет гораздо лучшую однородность, чем чистый бензин и воздух, следовательно, более низкая вероятность образования несгоревших углеводородов (НС). Эти результаты показывают, что можно достичь отличного компромисса между характеристиками, расходом топлива и эмиссией выхлопных газов для массовой доли сжатого природного газа около 30% от ТВС, данное решение показано в таблице 7.



Таблица 7 – Сравнительная таблица между комбинированным впрыском (30% CNG) и работой на одном топливе на 3000 об/мин при полной нагрузке.

Наименование	Работа только на бензине	Работа только на сжатом природном газе	Работа на комбинированном топливе (30% сжатого природного газа)
Среднее эффективное давления (BMEP), бар	16,2	16,2	16,2
Удельный расход топлива (BSFC), г/кВтч	303,4(+16%)	233(-11%)	261,9
CO, ppm ( $1 \cdot 10^{-6}$ ) миллионная доля	5,2(+200%)	0,43(-75%)	1,75
HC, ppm	697,4(+100%)	201,1(-42%)	349,8
NOx, ppm	556,56(-69%)	3446,9(+192%)	1792,9

Таблица 7 показывает, что в комбинированном режиме все элементы имеют наилучшие показатели, кроме выбросов NOx. Тем не менее, выгоды от двойного сгорания топлива при полной нагрузке могут быть значительными, поскольку в этом случае опасность детонации выше, а бензиновые двигатели работают с богатыми смесями. При уменьшении нагрузки на двигатель детонация становится менее опасной и вероятной, и топливовоздушная смесь может снова стать стехиометрической. Поскольку каталитические нейтрализаторы выхлопных газов больше используются в двигателях, такие условия стехиометрического сгорания в двигателе могут

быть очень полезными для производительности и эффективности таких катализаторов.

### **2.2.3.3 Заключение на основе проведенного эксперимента**

Результаты показывают, что комбинированный впрыск бензина и сжатого природного газа намного лучше, чем бензиновый режим с точки зрения расхода топлива и выбросов HC и CO. Однако, как и ожидалось, выброс NOx увеличится. Согласно полученным результатам при среднем эффективном давлении 16,2 бар, при полной нагрузке 3000 об / мин с массовой долей CNG 30%, удельный расход топлива, CO и HC улучшаются на 16, 200 и 100%, соответственно, по сравнению со стандартным режимом, при котором двигатель работает только на бензине.

Было обнаружено, что топливная смесь с массовой долей газа в 30% является наилучшим компромиссом между характеристиками двигателя и выбросами. Также наблюдалось значительное снижение расхода топлива. Испытания при полной нагрузке, проведенные с двигателем с турбонаддувом, усилили синергетический эффект между двумя видами топлива в условиях полной нагрузки.

В данном эксперименте были рассмотрены несколько недавних исследований производительности двухтопливных двигателей, и было отмечено, что в большинстве случаев основное внимание уделялось механическим и тепловым характеристикам, а в данном эксперименте также рассматривались выбросы выхлопных газов, особенно в качестве входных данных для каталитических нейтрализаторов.

Эффект от комбинации сжатого природного газа с бензином был исследован на инжекторном двигателе с турбонаддувом объемом 1,7 л. Он сочетает в себе преимущества каждого топлива, обеспечивая как высокую объемную эффективность, так и сильное сопротивление детонации. Таким образом, газ может выступать в качестве усилителя октанового числа для

обеспечения оптимального времени зажигания и заменять обогащение бензиновым топливом, сохраняя при этом номинальную производительность двухтопливного двигателя. Кроме того, поскольку стехиометрия может поддерживаться при полной нагрузке в смешанном случае, обычный трехходовой каталитический нейтрализатор будет эффективно работать во всем рабочем диапазоне двигателя относительно стехиометрического лямбда-окна. Было отмечено, что удельный расход топлива снизился на 13% при 3000 об / мин в режиме полной нагрузки по сравнению с бензиновым режимом. Был сделан вывод, что комбинированный впрыск приводит к лучшей производительности и экономии топлива.

Эксперименты показали, что из-за улучшения тенденции к детонации смешанный впрыск бензина и сжатого природного газа намного лучше, чем просто бензиновый режим, с точки зрения расхода топлива и эмиссии вредных веществ. Сравнение показывает, что при 3000 об/мин, массовой доле газа в 30% и условиях полной нагрузки удельный расход топлива, выбросы СО и НС в комбинированном режиме улучшаются на 16, 200 и 100% соответственно, чем относительно бензинового режима. Тем не менее, выброс NOx выше на 69%, что может затруднить соблюдение нормативных пределов для работы обычных катализаторов.

### **Выводы по главе**

В данной главе рассматривалось два исследования на основе применения сжатого природного газа в двигателях внутреннего сгорания.

Первое исследование было основано на одноцилиндровом двигателе внутреннего сгорания. В данном исследовании было выяснено, что основным составляющим веществом природного газа является метан. Максимальная мощность двигателя при использовании бензина составляла около 2,6-2,7 кВт при 3600 об/мин, при добавлении сжатого природного газа в цилиндр эта мощность уменьшилась до 2,2 кВт, это означает, что мощность упала примерно на 18,5%. Еще одним минусом двигателя на метане является давление внутри цилиндра, которое в условиях моделирования уменьшилось на 20%, но есть и положительная сторона применения газа в двигателях внутреннего сгорания – это токсичность. Эмиссия от вредных веществ уменьшается в разы, а значит и достигается главная задача применение метана – уменьшение количества выбросов в атмосферу.

Вторая работа посвящена исследованию, среднего эффективного давления, удельного расхода топлива и эмиссии выхлопных газов. Данные исследования проведены на основе 1,7 литрового турбированного двигателя.

В ходе моделирование было проведено три опыта. В первом опыте двигатель работал только на бензине, во втором только на газе и в третьем опыте был применен комбинированный впрыск сжатого природного газа (30% от общей доли ТВС) и бензина.

Удельное эффективное давление при работе двигателя на бензине оказалось выше на 7% чем при работе двигателя на газе, но в комбинированном режиме этот показатель удалось привести к 16,2 бар, что эквивалентно работе двигателя на бензине.

Удельный расход топлива в комбинированном режиме составил 261,9 г/кВтч, этот же показатель при работе ДВС только на бензине составил 303,4 г/кВтч (+13% в сравнении с комбинированным режимом), в режиме при

использовании только сжатого природного газа показатель BSFC составил 233,4 г/кВтч (-11% в сравнении с комбинированным режимом).

Следующие показатели, которые мы исследовали – это эмиссия выхлопных газов. Эмиссия состоит из трех основных веществ:

Углекислый газ (CO);

Углеводород (HC);

Оксид азота (NO<sub>x</sub>).

По этим трем показателям мы сделали анализ и вот что он показал. В комбинированном режиме показатель CO составил 1,75 ppm, HC = 349,8 ppm, NO<sub>x</sub> = 1792,9 ppm. В режиме работы двигателя только на бензине CO=5,2 ppm, HC = 697,4 ppm, NO<sub>x</sub> = 556,56 ppm. В режиме работы двигателя только на сжатом природном газе данные показатели стали следующими: CO=0,43 ppm, HC = 201,1 ppm, NO<sub>x</sub> = 3446,9 ppm. Анализ данных по выхлопным газам показывает, что при применении комбинированного впрыска показатели HC и CO уменьшаются, но при этом увеличиваются выбросы NO<sub>x</sub>.

## Заключение

В данной магистерской диссертации был выполнен анализ выходной мощности двигателя на сжатом природном газе. На основе этого анализа можно сделать вывод о том, что монотопливный силовой агрегат на сжатом природном газе удовлетворяет потребности человека в плане выбросов в атмосферу вредных веществ при сгорании топлива, однако его мощность сильно теряется и из-за этого он не может быть широко использован в автомобильной индустрии. Не многие люди выберут экономичность в ущерб мощности двигателю. Однако есть другое концептуальное решение, которое убьет сразу двух зайцев – это двигатель на сжатом природном газе с турбиной. Он сочетает в себе преимущества монотопливного CNG двигателя и при этом не теряет мощности. Масштабное производство таких силовых агрегатов может популяризировать двигатели на сжатом природном газе.

Таким образом, в данной диссертации были решены задачи, поставленные в начале работы, а также сделаны выводы о применении монотопливных силовых агрегатов в повседневной жизни. Самой главной задачей для таких двигателей является решение задачи уменьшения выходной мощности, которую постарались раскрыть в данной работе.

Мое мнение, что турбированный двигатель на сжатом природном газе – это будущее автомобилестроения, которое уже не за горами.

1. Изучены вопросы влияния применения сжатого природного газа в комбинированном двигателе, монотопливном силовом агрегате и турбированном двигателе. Самым перспективным является комбинированный турбированный силовой агрегат, так как он меньше всего теряет в выходной мощности, и при этом уменьшает выбросы вредных веществ в атмосферу.

2. Анализ литературы установил различные причины потери мощности двигателя, такие как объемный КПД, низкая скорость воспламенения топливо-воздушной смеси. Эти проблемы решаются применением

комбинированных двигателей с турбиной, вместо монотопливных силовых агрегатов.

### Список используемой литературы

1. BP Statistical Review of World Energy 2014, (<http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>) [accessed on September 14, 2014].
2. Natural Gas in the World. 2014 edition; CEDIGAZ: France; 2014.
3. International Energy Agency. World Energy Outlook. OECD/IEA; 2011.
4. Annual Energy Outlook 2014: with projections to 2040. US Energy Information Administration (EIA) 2014, ([http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2014).pdf)); 2014 [accessed on October 5, 2014].
5. Jahirul MI, Masjuki HH, Saidur R, Kalam MA, Jayed MH, Wazed MA. Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine. Appl Therm Eng 2010;26:2219–26.
6. Khan MI, Yasmin T. Development of natural gas as a vehicular fuel in Pakistan: issues and prospects. J Nat Gas Sci Eng 2014;17:99–109.
7. Egúsquiza JC, Braga SL, Braga CVM. Performance and gaseous emissions characteristics of a natural gas/diesel dual fuel turbocharged and aftercooled engine. J Braz Soc Mech Sci Eng 2009;31(2):142–50.
8. A high-performing, competitive vehicle—and a sustainable solution. Volvo Trucks, (<http://www.volvotrucks.com/trucks/global/en-gb/trucks/newtrucks/Pages/volvo-fm-methanediesel.aspx>); 2014 [accessed on Oct. 10, 2014].
9. International Experience with CNG Vehicles. Technical paper no. 24062. World Bank, ([http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/BN2\\_International\\_experience\\_with\\_CNG\\_vehicles.pdf](http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/BN2_International_experience_with_CNG_vehicles.pdf)); 2001 [accessed on August 19, 2014].
10. Poulton ML. Alternative fuel for road vehicles. UK: WIT Press/Computational Mechanics; 1994.

11. Alagumalai A. Internal combustion engines: progress and prospects. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2014;38:561–71.
12. Ehsan M. Effect of spark advance on a gas run automotive spark ignition engine. *J Chem Eng Jpn* 2006;24(1):42–9.
13. Semin Bakar RA. A technical review of compressed natural gas as an alternative fuel for internal combustion engines. *Am J Eng Appl Sci* 2008;1(4):302–11.
14. Ramjee E, Kumar KV. Performance analysis of a 4-stroke SI engine using CNG as an alternative fuel. *Indian J Sci Technol* 2011;4(7):801–4.
15. Evans RL, Blaszczyk J. A comparative study of the performance and exhaust emissions of a spark ignition engine fuelled by natural gas and gasoline. *Proc Inst Mech Eng Part D* 1997;211:39–47.
16. Darade1 PM, Dalu RS. Investigation of performance and emissions of CNG fuelled VCR engine. *Int J Emerg Technol Adv Eng* 2013;3(1):77–83.
17. Kalam MA, Masjuki HH, Amalina MA, Abdesselam H, Mahlia TMI, Aslam MU. Emission characteristics of a modified CNG gasoline-cycle engine. In: *Proceeding of the SPE Asia Pacific oil and gas conference and exhibition: SPE paper # 93350*, Jakarta, Indonesia; April 5–7, 2005.
18. Shamekhi AH, Khatibzadeh N. A comprehensive comparative investigation of compressed natural gas as an alternative fuel in a bi-fuel spark ignition engine. *Iran J Chem Chem Eng* 2008;27(1):73–83.
19. Tantawy MF. An investigation of the performance and pollution for spark ignition engines using gasoline & gasoline alcohol blend and natural gas as a fuel. *Aust J Basic Appl Sci* 2011;5(6):691–7.
20. Singh R. Performance and exhaust gas emissions analysis of direct injection CNG–diesel dual fuel engine. *Int J Eng Sci Technol* 2012;4(3):833–46.
21. Sera ML, Bakar RA. The comparison study on 1.5 L engine performance and emission using gasoline and natural gas fuel. In: *Proceeding of the Malaysian science and technology congress*, Melaka, Malaysia; 2001.



22. Duan S.Y. Using natural gas in engines: laboratory experience with the use of natural gas fuel in IC engines. In: Proceedings of the IMechE seminar, London; December 1996. p. 39-46.
23. Mohamad TI. Development of a spark plug fuel injector for direct injection of methane in spark ignition engine. Cranfield University; 2006 PhD thesis.
24. Shinde TB. Experimental investigation on effect of combustion chamber geometry and port fuel injection system for CNG engine. IOSR J Eng 2012;2(7):49–54
25. Geok HH, Mohamad TI, Abdullah S, Ali Y, Shamsudeen A, Adril E. Experimental investigation of performance and emission of a sequential port injection natural gas engine. Eur J Sci Res 2009;30(2):204–14.
26. Bauer CG, Forest TW. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles, Part I: Effect on S.I. engine performance. Int J Hydrog Energy 2001;26:55–70.
27. Jones AL, Evans RL. Comparison of burning rates in a natural gas-fueled spark ignition engine. J Eng Gas Turbines Power 1985:903–13.
28. Fanhua M, Wang Y, Liu H. Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine. Int J Hydrog Energy 2007;32:5067–75.
29. Hoekstra RL, Blarigan PV, Mulligan N. NO<sub>x</sub> emissions and efficiency of hydrogen, natural gas and hydrogen/natural gas blended fuels. SAE transactions: Paper no. 961103;1996.
30. Chiodi M, Berner HJ, Bargene M. Investigation on different injection strategies in a direct-injected turbocharged CNG engine. . SAE: Paper no. 2006-01-3000;2006 .
31. Liu YF, Liu B, Liu L, Zeng K, Huang ZH. Combustion characteristics and particulate emission in a natural-gas direct-injection engine: effects of the injection timing and the spark timing. Proc Inst Mech Eng Part D J Automob Eng 2010:224.

32. Tilagone R, Monnier G, Chaouche A, Baguelin Y, Chauveron DS. Development of a high efficiency, low emission SI-CNG bus engine, SAE: Paper no. 961080;1996.
33. Kubesh JT, Igarashi DJ, Guglielmo KH, McaCaw D. Development of an electronically-controlled natural gas-fueled John Deere Power Tech 8.1 L engine. SAE: Paper no. 951940; 1995.
34. Kalam MA, Kazi SN, Jayed MH. Power boosting of a modified natural gas engine. *Int J Phys Sci* 2011;6(28):6548–57.
35. Maxwell TT, Jones JC. Alternative fuels: emissions, economics and performance. USA: Society of Automotive Engineers Inc; 1995.
36. Suresh MT, Bhatt VR, Jani RJ. Effect of Ignition energy on performance and emission of CNG fuelled Bi-fuel Engine: experimental Investigation. *Int J Adv Eng Res Dev* 2014;1(5) xx.
37. Ishii M, Ishizawa S, Inada E, Idoguchi R, Sekiba T. Experimental studies on natural gas vehicles. SAE: Paper no. 942005; 1994. M.I. Khan et al. / *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (2015) 785–797 795
38. Beck NJ, Barkhimer RL, Johnson WP, Wong HC, Gebert K. Evolution of heavy duty natural gas engines—stoichiometric, carbureted and spark ignited to lean burn, fuel injected and micro-pilot. SAE: Paper no. 972665; 1997.
39. Bach C, Lammle C, Bill R, Soltic P, Dyntar D, Janner P. Clean engine vehicle a natural gas driven Euro-4/SULEV with 30% reduced CO<sub>2</sub>-emissions. SAE: Paper no. 2004-01-0645; 2004.
40. Thomas JF, Staunton RH. What fuel economy improvement technologies could aid the competitiveness of light-duty natural gas vehicles. SAE: Paper no.1999-01-1511;1999
41. Momeni, Movahed M., Basirat, Tabrizi H., Mirsalim, M.: Experimental investigation of the combined injection of gasoline and CNG in a turbocharged spark ignition engine. *Energy Convers. Manag.* 80, 126–136 (2014).
42. Mehrnoosh, D., Asghar, H.A., Asghar, M.A.: Thermodynamic model for prediction of performance and emission characteristics of SI engine fuelled by

gasoline and natural gas with experimental verification. *J. Mech. Sci. Technol.* 26(7), 2213–2225 (2012).

43. Baloo, M., Dariani, B.M., Akhlaghi, M., Chitsaz, I.: Effect of isooctane/methane blend on burning velocity and flame instability. *Fuel* 144, 264–273 (2015).

44. Baloo, M., Dariani, B.M., Akhlaghi, M., AghaMirsalim, M.: Effects of pressure and temperature on laminar burning velocity and flame instability of isooctane/methane fuel blend. *Fuel* 144, 264–273 (2015).