

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 Анализ соответствия токсичности двигателя на сжатом  
природном газе современным нормам токсичности

Студент

С. О. Симкин  
(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

## Содержание

Введение .....	5
1 Экологические стандарты «Евро» для легковых автомобилей с бензиновыми двигателями.....	8
1.1 Экологический стандарт «Евро-0» .....	10
1.2 Экологический стандарт «Евро-1» .....	10
1.3 Экологический стандарт «Евро-2» .....	11
1.4 Экологический стандарт «Евро-3» .....	11
1.5 Экологический стандарт «Евро-4» .....	12
1.6 Экологический стандарт «Евро-5» .....	12
1.7 Экологический стандарт «Евро-6» .....	13
1.8 Выводы по разделу экологические стандарты «Евро» для легковых автомобилей с бензиновыми двигателями.....	14
2 Обзор токсичных веществ в отработавших газах транспортных средств .....	15
2.1 Основные компоненты выхлопных газов автомобилей .....	15
2.2 Процессы образования основных токсичных веществ в двигателе	17
2.2.1 Оксид углерода .....	17
2.2.2 Углеводороды .....	18
2.2.3 Оксиды азота .....	19
2.2.4 Твердые частицы .....	20
2.3 Процесс сгорания топлива в двигателе .....	20
2.4 Выводы по разделу обзор токсичных веществ в отработавших газах транспортных средств .....	22
3 Альтернативные виды топлива .....	24
3.1 Свойства альтернативных видов топлива .....	24
3.2 Энергозатраты для производства альтернативных видов топлива	25
3.3 Природный газ как альтернативное топливо для транспортных средств .....	26

3.4	Физико-химические свойства сжатого природного газа для двигателей внутреннего сгорания .....	27
3.5	Технико-эксплуатационные показатели автотранспортных средств, работающих на сжатом природном газе .....	29
3.6	Выводы по разделу альтернативные виды топлива .....	30
4	Обзор легковых транспортных средств на сжатом природном газе.....	32
4.1	Обзор легковых автомобилей российского производства .....	34
4.2	Обзор легковых автомобилей Lada, работающих на сжатом природном газе .....	35
4.3	Обзор двигателя ВАЗ-21129 .....	38
4.4	Выводы по разделу обзор легковых транспортных средств на сжатом природном газе .....	41
5	Проектирование и расчет двигателя в программном комплексе «Wave Ricardo» .....	42
5.1	Сравнение основных характеристик проектируемого бензинового двигателя с показателями двигателя ВАЗ-21129 .....	43
5.2	Соотношения токсичности ОГ .....	46
5.3	Расчет количества оксидов азота NO <sub>x</sub> в отработавших газах двигателя при работе на бензине .....	47
5.4	Расчет количества угарного газа СО в отработавших газах двигателя при работе на бензине .....	50
5.5	Расчет количества углеводородов СН в отработавших газах двигателя при работе на бензине .....	52
5.6	Сравнение основных характеристик двигателя на сжатом природном газе с показателями бензинового двигателя .....	54
5.7	Анализ и сравнение динамических характеристик двигателей автомобилей Lada Vesta и Lada Vesta CNG .....	56
5.8	Расчет количества оксидов азота NO <sub>x</sub> в отработавших газах двигателя при работе на сжатом природном газе .....	57
5.9	Расчет количества угарного газа СО в отработавших газах	

двигателя при работе на сжатом природном газе .....	59
5.10 Расчет количества углеводородов СН в отработавших газах двигателя при работе на бензине .....	61
5.11 Выводы по разделу проектирование и расчет двигателя в программном комплексе «Wave Ricardo» .....	63
Заключение .....	65
Список используемых источников .....	70
Приложение А Общие расчетные показатели двигателя при работе на бензине.....	74
Приложение Б Общие расчетные показатели двигателя при работе на сжатом природном газе.....	76

## Введение

### **Актуальность работы и научная значимость настоящего исследования.**

Сжатый природный газ вызывает все больший интерес в качестве альтернативного топлива для транспортных средств и стационарных двигателей, которые используют бензин и дизельное топливо. Причинами использования природного газа являются его высокая распространенность, низкая цена, снижение выбросов токсичных газов и твердых частиц по сравнению с другими видами ископаемого топлива. Под токсичностью выбросов двигателей внутреннего сгорания подразумевают способность отработавших газов двигателя оказывать вредное воздействие на живые организмы и окружающую среду. Такое влияние определяется составом токсичных веществ, их физико-химическими законами превращения, геофизическими законами распространения токсичных веществ и чувствительностью организмов. [1]. Поэтому исследования токсичности двигателей на альтернативных топливах является актуальной задачей современных исследований.

Анализ токсичности двигателя на сжатом природном газе при современной тенденции развития применения альтернативных источников топлива показывает актуальность данной работы.

**Объект исследования:** двигатель внутреннего сгорания, работающий на сжатом природном газе.

**Предмет исследования:** соответствие токсичности двигателя на сжатом природном газе современным нормам токсичности.

**Целью работы** является анализ соответствия токсичности двигателя на сжатом природном газе современным нормам токсичности.

**Гипотеза исследования** состоит в том, что в мире происходит систематическое ужесточение экологических требований к производству и эксплуатации автотранспортных средств, в том числе на сжатом природном газе, поэтому анализ и контроль токсичности газовых транспортных средств

станет неотъемлемой частью при разработке новых моделей двигателей, работающих на сжатом природном газе.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением **следующих задач:**

1. Провести разработку виртуальной модели двигателя на сжатом природном газе, схожего по характеристикам к серийно выпускаемым моделям.
2. Провести расчет виртуальной модели двигателя и выполнить анализ содержания вредных веществ в отработавших газах

**Методы исследования:** метод экспериментального исследования, метод статистической обработки результатов эксперимента и моделирования рабочего процесса.

**Научная новизна исследования** заключается в определении токсичности двигателя путем расчетов в программном комплексе и выявление соответствия к установленным мировым требованиям.

**Апробация и внедрение результатов работы** велись в течение всего исследования. Его результаты докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» в 2019 и 2020 г.
- на международной научно-практической конференции: «Актуальные вопросы образования и науки» (Тамбов, 30 апреля 2020 г.).
- опубликована научная статья: Определение продолжительности процесса сгорания по изменению показателя политропы в ДВС с искровым зажиганием // Научный альманах. 2020. №4-1 (66). С. 72-76. Объем статьи 0,31 усл. печ. л.

**На защиту выносятся:**

- расчетная модель двигателя на сжатом природном газе;
- сравнение динамических характеристик двигателей на бензине и на сжатом природном газе;

- анализ содержания токсичных компонентов в отработавших газах расчетного двигателя.

**Структура магистерской диссертации.** Диссертации состоит из введения, 5 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 22 рисунка, 28 таблиц, списка использованных источников (24 источника), 2 приложения. Основной текст изложен на 77 страницах.

## **1 Экологические стандарты «Евро» для легковых автомобилей с бензиновыми двигателями**

По данным ГИБДД РФ на 1 января 2020 года всего в российских регионах зафиксировано почти 53 миллиона транспортных средств. Из них 84% (или 44,5 млн) – легковые автомобили, 4,2 млн машин – коммерческие легковые автомобили. Кроме того, 4% от общего числа составляют грузовые автомобили.

В мире происходит систематическое ужесточение экологических требований к производству и эксплуатации автотранспортных средств – запрет применения вредных веществ (свинец, фреоны, 6-валентный хром, кадмий, кобальт) в процессе производства транспортных средств, запрет использования этилированного бензина в процессе эксплуатации автомобилей.

Ведется ужесточение требований к содержанию токсичных вредных веществ в отработанных газах (ОГ) двигателей – окиси углерода (СО), окислов азота ( $\text{NO}_x$ ), углеводородов (СН) и их испарений. Также актуально снижение выбросов углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), что взаимосвязано с расходом топлива и разрушением озонового слоя Земли.

Проблема экологичности отработанных газов транспортных средств возникла в 50-х годах XX века, когда автомобили получили широкое распространение. Страны Европы, находящиеся на относительно небольшой территории, начали первыми применять экологические стандарты и требования для автотранспортных средств.

Первым введенным регламентом стал Евро-0, введенный в 1988 году Европейской экономической комиссией ООН, требовавший снижения уровня окислов азота, окиси углерода и других веществ в выхлопных газах автомобилей. Экологические требования ужесточались с периодичностью в несколько лет и затем стали применяться в ряде других стран.

Российская Федерация придерживается установленным в Европе стандартам токсичности отработавших газов, однако их реализация отстает на 5-7 лет.

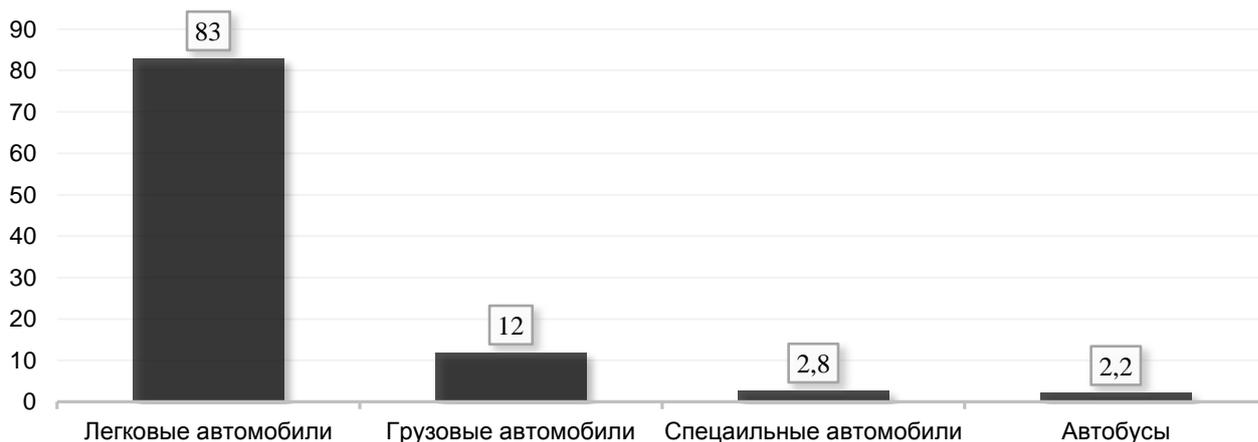


Рисунок 1.1 - Доля загрязнения выхлопными газами, %

Для выполнения все более жестких стандартов контроля за выбросами, которые появляются в настоящее время, потребуются транспортные средства на альтернативном топливе. Представляется, что для этого потребуются оптимизированные и специализированные системы, использующие инновационные стратегии управления для достижения необходимых экологических стандартов.

Европейские экологические стандарты строго ограничивают допустимое количество токсичных и загрязняющих атмосферу веществ в отработавших газах автомобилей. Каждый новый «Евро» стандарт еще сильнее ужесточает эти ограничения, снижая интенсивность загрязнения окружающей среды.

Европейским экологическим стандартом регулируется выброс следующих веществ [3]:

- Оксид углерода (CO);
- Углеводороды (CH);
- Оксиды азота (NO<sub>x</sub>);
- Твердые частицы (PM);
- Количество твердых частиц (PN).

### **1.1 Экологический стандарт «Евро-0»**

Введен в Евросоюзе в 1988 году Европейской экономической комиссией ООН. Стандарт «Евро-0» требовал снижение количества в отработавших газах бензиновых двигателей оксидов углерода (СО), углеводородов СН или НС, а также оксидов азота (NO<sub>x</sub>), преимущественно диоксида NO<sub>2</sub>, образование которого происходит при окислении монооксида азота NO кислородом воздуха. Основные ограничения выбросов стандарта «Евро-0»:

- СО (окись углерода): 11,2 г/кВт-ч;
- СН (углеводороды): 2,4 г/кВт-ч;
- NO<sub>x</sub> (оксиды азота): 14,4 г/кВт-ч.

Количество дыма и твердых частиц стандарт не регламентировал и не накладывал ограничений.

### **1.2 Экологический стандарт «Евро-1»**

Принят в Европейском союзе в 1992 году директивой 91/441/ЕЕС (для пассажирских автотранспортных средств). Стандарт «Евро-1» регулировал содержание токсичных веществ в отработавших газах так, чтобы выброс оксида углерода (СО) должен был составлять не более 2,72 г/км, углеводородов не более 0,72 г/км, оксидов азота NO<sub>x</sub> не более 0,27 г/км. Принятый стандарт распространялся на легковые, грузовые и специальные транспортные средства, которые эксплуатировались и продавались в Европейском союзе. Владельцев, чьи автомобили не соответствовали принятым нормам, обязали модернизировать свои транспортные средства установкой каталитических нейтрализаторов для достижения стандарта «Евро-1», иначе нарушение стандарта влекло наложением штрафов.

### **1.3 Экологический стандарт «Евро-2»**

Введен в Европейском союзе в 1996 году директивой 94/12/ЕС (& 96/69/ЕС). Согласно введённому стандарту, действовали следующие ограничения по количеству веществ в выхлопе:

- СО (окись углерода): не более 2,2 г/км;
- СН (углеводороды): не более 0,5 г/км;
- NO<sub>x</sub> (оксиды азота): не более 0,27г/км.

В 2005 году стандарт «Евро-2» введен в России, при этом были наложены технические ограничения на импорт автомобилей, не соответствующих принятому стандарту.

### **1.4 Экологический стандарт «Евро-3»**

Принят в Европейском союзе в 2000 году по директиве 98/69/ЕС. Стандарт «Евро-3» ужесточил требования и уменьшил допустимый уровень выбросов в среднем на 40%:

- СО (окись углерода): не более 2,3 г/км;
- СН (углеводороды): не более 0,2 г/км;
- NO<sub>x</sub> (оксиды азота): не более 0,15г/км.

Также, согласно принятому стандарту, снижалось максимально допустимое количество серы в составе бензина с 500 г/км до 150 г/км.

При разработке новых двигателей, соответствующих «Евро-3», возникла необходимость глубокой модернизации систем впуска, из-за чего значительно падала мощность разрабатываемых двигателей.

В России стандарт введен в 2008 году, при этом все ввозимые автомобили, не соответствующие «Евро-3», должны были проходить модификацию системы выпуска отработавших газов и управления двигателем, либо снижение мощности двигателя.

### 1.5 Экологический стандарт «Евро-4»

Введен в Европейском союзе в 2005 году директивой 98/69/ЕС (& 2002/80/ЕС). Стандарт ужесточает требования к содержанию вредных веществ на 70% относительно стандарта «Евро-3»:

- CO (окись углерода): не более 1,0 г/км;
- CH (углеводороды): не более 0,1 г/км;
- NO<sub>x</sub> (оксиды азота): не более 0,08 г/км.

Снижение выбросов до стандартов «Евро-4» достигалось путем применения специальных каталитических нейтрализаторов или фильтров технологической очистки выхлопных газов, что позволило снизить выбросы токсичных веществ до 50%.

### 1.6 Экологический стандарт «Евро-5»

Введен в Европейском союзе в 2009 году директивой 715/2007/ЕС (для легкового транспорта). Основные ограничения стандарта «Евро-5» приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Ограничения выбросов «Евро-5» для бензиновых двигателей [4]

Категория	Класс	Контрольная масса (кг)	Предельные значения массы, мг/км				
			CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	PM*
M	-	Все	1000	100	68	60	5,0
N <sub>1</sub>	1	KM ≤ 1305	1000	100	68	60	5,0
	2	1305 < KM ≤ 1760	1810	130	90	75	5,0
	3	1760 < KM	2270	160	108	82	5,0
N <sub>2</sub>	-	-	2270	160	108	82	5,0

\* - для автомобилей с системами непосредственного впрыска

Экологический стандарт «Евро-5» также регламентирует поддержание заданных требований по количеству выбросов на протяжении 160 тыс. км пробега транспортного средства (80 тыс. км для «Евро-4») [5].

«В соответствии с Техническим регламентом № 609 «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ» экологический класс Евро-5 был введен с 1 января 2016 года. С этого времени все автомобили, попадающие на территорию России, должны соответствовать данному экологическому стандарту. Это касается как транспортных средств, производимых на отечественных заводах, так и всего транспорта, ввозимого на территорию страны из-за границы: и нового, и подержанного; и для личных целей, и для коммерческого использования».

Увеличены «коэффициенты ухудшения» для транспортных средств с двигателями с искровым зажиганием: CO – 1,5; THC – 1,3; NO<sub>x</sub> – 1,6 («Евро-4» - 1,2 для все компонентов». Это означает, что при проведении сертификационных испытаний автомобиль должен иметь значительно больший ресурсный запас к установленным лимитам выбросов, за исключением переоборудования двигателей под сертификационные испытания «Евро-5», регламентируемые Правилами ЕЭК ООН № 49, 83. Исходя из этого, соответствие транспортного средства экологическому классу «Евро-5» определяется не только по году выпуска, но и по пробегу, наличию систем снижения вредных выбросов или работ по переоборудованию двигателя под нормы «Евро-5».

### **1.7 Экологический стандарт «Евро-6»**

Действующий стандарт в Европейском союзе на основании директив 459/2012/ЕС и 2016/646/EU, введен в 2014 году. Регламент «Евро-6» жестко ограничивает выбросы дизельных двигателей. Количество допустимой концентрации оксидов азота (NO<sub>x</sub>) сокращено с 2 до 0,4 г/кВт-ч, уровень твердых частиц (PM) уменьшен – с 0,02 до 0,01 г/кВт-ч, содержание

остаточных углеводородов (НС) снижено с 0,46 до 0,13 г/кВт-ч. Выбросы бензиновых двигателей стандарт «Евро-6» регламентирует на уровне «Евро-5», за исключением незначительного снижения требуемого уровня твердых частиц с 5,0 мг/км до 4,5 мг/км и ограничением количества твердых частиц до  $6,0 \times 10^{11}$  для транспортных средств, оснащенных системой непосредственного впрыска топлива. Ограничения выбросов стандарта «Евро-6» для бензиновых двигателей приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Ограничения выбросов «Евро-6» для бензиновых двигателей [6]

Категория	Класс	Контрольная масса (кг)	Предельные значения массы, мг/км					
			CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	PM*	PN*
M	-	Все	1000	100	68	60	4,5	$6,0 \times 10^{11}$
N <sub>1</sub>	1	КМ ≤ 1305	1000	100	68	60	4,5	$6,0 \times 10^{11}$
	2	1305 < КМ ≤ 1760	1810	130	90	75	4,5	$6,0 \times 10^{11}$
	3	1760 < КМ	2270	160	108	82	4,5	$6,0 \times 10^{11}$
N <sub>2</sub>	-	-	2270	160	108	82	4,5	$6,0 \times 10^{11}$

\* - для автомобилей с системами непосредственного впрыска

### **1.8 Выводы по разделу экологические стандарты «Евро» для легковых автомобилей с бензиновыми двигателями**

Для улучшения экологической ситуации в мире были введены специальные экологические стандарты, характеризующие все транспортные средства согласно количеству токсичных веществ, выбрасываемых ими в атмосферу. На сегодняшний день на территории Российской Федерации, начиная с 2016 года, действует экологический стандарт «Евро-5».

Градация автомобильного транспорта по экологическим классам и установленные максимальные нормы выбросов позволяют значительно сократить количество выбросов и ввести контроль за производством и эксплуатацией транспортных средств, работающих на углеводородном топливе.

## 2 Обзор токсичных веществ в отработавших газах транспортных средств

### 2.1 Основные компоненты выхлопных газов автомобилей

Полное сжигание топлива с получением только углекислого газа и воды практически невозможно даже при очень бедной смеси. Это связано с тем, что в фазе сгорания рабочего цикла двигателя химические реакции не достигают равновесных условий и появляются неоднородные газовые смеси, что делает возможными вторичные химические реакции (неполное сгорание).

Таблица 2.1 – Состав выхлопных газов бензинового двигателя без каталитического нейтрализатора

Компонент	Формула	Кг/кг топлива	Кг/л топлива	Масса, %	Объем, %
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	2,71	2,019	17,0	10,9
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	1,33	0,99	8,3	13,1
Кислород	O <sub>2</sub>	0,175	0,13	1,1	1,0
Азот	N <sub>2</sub>	11,5	8,568	72,0	72,8
Водород	H <sub>2</sub>	5,6·10 <sup>-3</sup>	4,2·10 <sup>-3</sup>	3,25·10 <sup>-2</sup>	0,5
Всего				98,4	97,8
Угарный газ	CO	0,224	0,167	1,4	1,4
Углеводороды	HC	2,0·10 <sup>-2</sup>	1,5·10 <sup>-2</sup>	0,13	0,27
Окиси азота	NO <sub>x</sub>	1,7·10 <sup>-2</sup>	1,3·10 <sup>-2</sup>	0,11	0,1
Всего				1,64	1,77
Оксиды серы	SO <sub>2</sub>	3,3·10 <sup>-4</sup>	2,4·10 <sup>-4</sup>	2,0·10 <sup>-3</sup>	9,0·10 <sup>-4</sup>
Сульфаты	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,3·10 <sup>-5</sup>	1,7·10 <sup>-5</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>	4,0·10 <sup>-5</sup>
Альдегиды	RCHO	3,4·10 <sup>-4</sup>	2,5·10 <sup>-4</sup>	2,0·10 <sup>-3</sup>	2,0·10 <sup>-3</sup>
Аммиак	NH <sub>3</sub>	1,5·10 <sup>-5</sup>	1,1·10 <sup>-5</sup>	1,0·10 <sup>-4</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>
Соединения свинца		1,0·10 <sup>-4</sup>	7,5·10 <sup>-5</sup>	6,0·10 <sup>-5</sup>	-

Более 98% по массе выхлопных газов состоит из углекислого газа, воды, кислорода, азота и водорода.

За ними следуют ограниченные компоненты выхлопных газов как характерные продукты неполного сгорания с общим содержанием около 1,6% по массе. Это монооксид углерода - промежуточная стадия образования

двуокиси углерода, затем общие углеводороды – несгоревшие компоненты топлива вместе с их вновь образовавшимися химическими соединениями - и, наконец, оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) - продукты окисления азота всасываемого воздуха - главным образом монооксид азота ( $\text{NO}$ ) и диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ).

На рисунке 2.1 показано влияние соотношения топливовоздушной смеси на выброс вредных веществ с отработавшими газами, где по оси координат отложена относительная концентрация выбросов  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{CH}$  без шкалы значений величин.

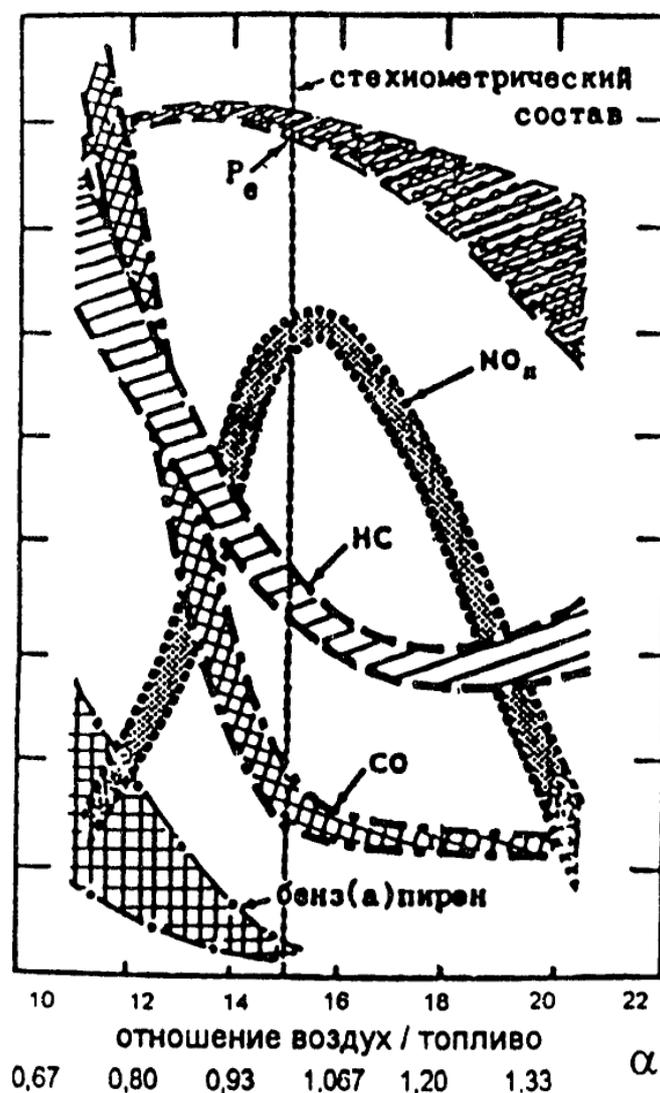


Рисунок 2.1 – Влияние состава топливовоздушной смеси на токсические показатели бензинового двигателя [7].

С помощью трехходового каталитического нейтрализатора, управляемого датчиком кислорода, значения CO, HC и NO снижаются примерно в 20 раз, что означает, что для суммы CO, HC и NO получены значения 0,082% по массе и 0,078% по объему. Сравнительно небольшое оставшееся количество компонентов выхлопных газов, составляющее менее 0,05% по массе выбросов выхлопных газов в случае двигателя без каталитического нейтрализатора, представляет собой неограниченные (нерегулируемые) компоненты выхлопных газов [8]. Их основными представителями являются водород (продукт пиролиза углеводородов), сернистые соединения (продукты окисления сернистого состава топлива), альдегиды (частично окисленные углеводороды) и аммиак (продукт восстановления оксида азота). Их концентрация (% по массе) составляет около 5 степеней из десяти меньше, чем у ограниченных веществ, и являются микроэлементами. Кроме того, вместе с этилированным бензином выделяются также свинцовые соединения, главным образом галогены свинца.

За исключением соединений свинца, все упомянутые вещества также присутствуют в выхлопных газах дизельных двигателей, однако из-за еще более бедной воздушно-топливной смеси с гораздо более низкими концентрациями.

## **2.2 Процессы образования основных токсичных веществ в двигателе**

### **2.2.1 Оксид углерода**

Оксид углерода CO (угарный газ) – прозрачный ядовитый газ без запаха, легче воздуха, является продуктом неполного сгорания топлива. Плотность CO – 1,25 г/л, температура кипения – минус 195°C. Горит на воздухе синим пламенем с образованием диоксида углерода (углекислого газа) по реакции:



Оксид углерода образуется в камерах сгорания двигателя в результате холоднопламенных реакций при неудовлетворительном распылении топлива, а также при сгорании топлива с недостатком кислорода (рисунок 2.2)

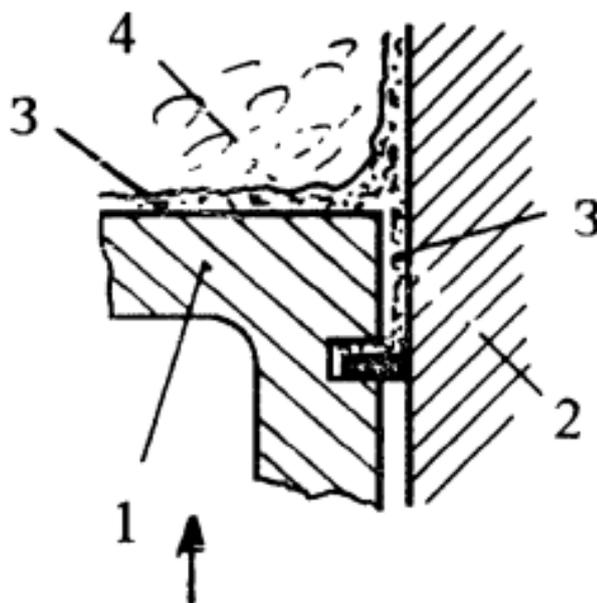


Рисунок 2.2 – Схема образования зон, насыщенных СО: 1 – поршень; 2 – гильза; 3 – несгоревшая и 4 – сгоревшая топливовоздушная смесь

### 2.2.2 Углеводороды

Углеводороды ( $C_nH_m$ : метан, этан, этилен, бензол, пропан, ацетилен и др.) являются токсичными веществами. В зарубежной технической литературе обозначаются как НС или ТНС – Total НС – суммарное количество углеводородов. Наличие углеводородов в отработавших газах двигателя объясняется в неоднородности газовой смеси в камере сгорания, поэтому в переобогащенных зонах у стенок цилиндров происходит затухание пламени и обрыв цепных реакций (рисунок 2.3).

Пары бензина, которые являются углеводородами, также токсичны. Содержание углеводородов в отработавших газах возрастает при работе двигателя на режимах принудительного холостого хода и дросселировании. Причиной этому является ухудшение процесса смесеобразования, уменьшение скорости сгорания, ухудшение воспламенения и как следствие возникновение частых пропусков воспламенения.

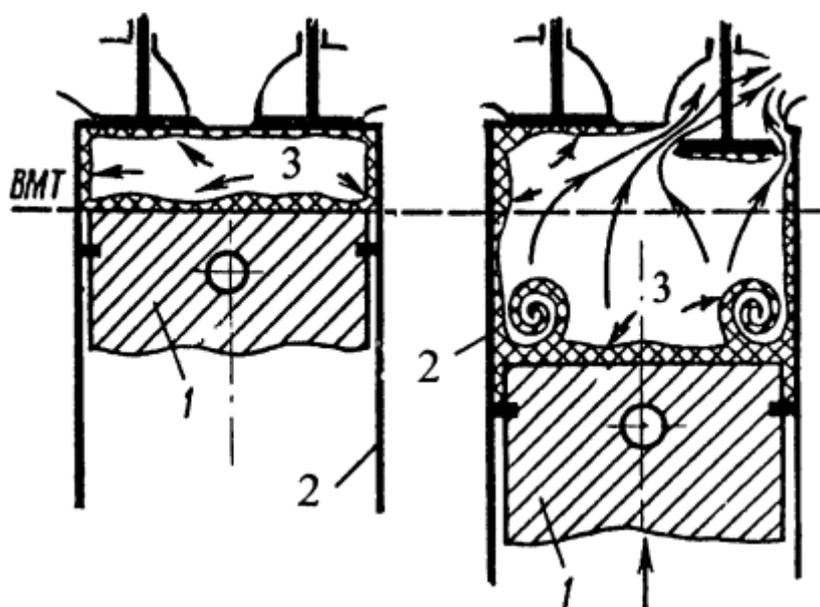


Рисунок 2.3 – Схема образования СН: 1 – поршень; 2 – гильза; 3 – пристеночные слои смеси.

### 2.2.3 Оксиды азота

Оксиды азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ , общее обозначение  $\text{NO}_x$ ) – самые токсичные компоненты в отработавших газах. При нормальных условиях азот представляет собой инертный газ, при высокой температуре и давлении вступает в реакцию с кислородом. В отработавших газах двигателей оксид азота  $\text{NO}$  составляет более 90% всего количества  $\text{NO}_x$ , который уже при попадании в систему выпуска отработавших газов, а затем в атмосфере начинает окисляться в диоксид азота по реакции:



На количество выбросов значительное влияние оказывает температура в камере сгорания. При увеличении температуры от 2500 до 2700 К скорость протекания реакции увеличивается в 2,6 раз, а при уменьшении от 2500 до 2300 К – скорость реакции уменьшается в 8 раз. Отсюда можно сделать вывод – чем выше температура в камере сгорания, тем выше концентрация оксидов азота.

«Ранний впрыск топлива или высокие давления сжатия в камере сгорания также способствуют образованию  $\text{NO}_x$ . Чем выше концентрация кислорода, тем выше концентрация оксидов азота.»

#### 2.2.4 Твердые частицы

Основной состав твердых частиц составляет сажа (углерод), также к ним можно отнести минеральные частицы из воздуха (пыль) и топлива (зола), частицы, включающие в себя компоненты топливных присадок и моторного масла, а также металлические частицы, возникающие в процессе износа трущихся поверхностей двигателя. В таблице 2.2. приведен примерный состав твердых частиц в отработавших газах двигателя.

Таблица 2.2 – Состав твердых частиц в отработавших газах бензинового двигателя

Компонент	Содержание, %
Углерод	41
Моторное масло	25
Сульфаты металлов и вода	14
Топливо	7
Остаток	13

Согласно определению EPA (Environment Protection Agency – Американское агентство по охране окружающей среды), понятие «твердая частица» — это «...любое вещество, за исключением воды, которое при температуре не выше 51,7°C осаждается на специальном фильтре при пропускании через него смеси ОГ с окружающим воздухом». Выбросы твердых частиц в отработавших газах дизельных двигателей превышают выбросы бензиновых двигателей в 50-70 раз.

#### 2.3 Процесс сгорания топлива в двигателе

Отработавшие газы, выбрасываемые транспортными средствами, образуются в результате сгорания топлива внутри двигателя, в процессе которого химическая энергия, накопленная в различных углеводородах в топливе, высвобождается в виде тепла. Основные физические процессы,

происходящие при преобразовании горения топлива в механическую работу, могут быть описаны с помощью подходящих рабочих циклов. В сравнении с этим, химические процессы, происходящие при работе двигателя внутреннего сгорания, до конца не изучены. Исходя из современных результатов измерений (в основном по некоторым компонентам выхлопных газов), а также из идеализированных экспериментальных моделях, можно попытаться привести выводы о химических процессах, протекающих при работе двигателя внутреннего сгорания.

Из известных данных о составе воздуха (Таблица 2.3) и составе топлива (Таблица 2.4) можно рассчитать, сколько килограммов воздуха необходимо для полного сгорания бензина.

Таблица 2.3 – Состав воздуха

Компонент	Формула	Сухой воздух		Влажный воздух (22 °С, 50% влажность)	
		Объем, %	Масса, %	Объем, %	Масса, %
Азот	N <sub>2</sub>	78,08	75,46	77,06	74,88
Кислород	O <sub>2</sub>	20,95	23,19	20,68	22,97
Инертные газы	-	0,94	1,3	0,93	1,29
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	0,03	0,05	0,03	0,05
Вода (пар)	H <sub>2</sub> O	-	-	1,3	0,81

Таблица 2.4 – Содержание углерода и водорода в топливах

Топливо	Плотность	С	Р
	Кг/л	Масса, %	Масса, %
Бензин 92	0,745	85,5	14,5
Бензин 95	0,76	85,8	14,2
ДТ	0,83	86,4	13,1

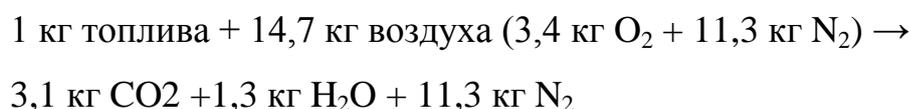
Соотношение фактической подачи воздуха и теоретически необходимого количества топлива составляет  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\text{Количество впускаемого воздуха}}{\text{Теоретическая потребность в воздухе}} \quad (3)$$

Соотношение, при котором  $\lambda = 1$  называется стехиометрическим. При меньшем количестве воздуха ( $\lambda < 1$ ) используется термин «богатая» смесь, а при избытке воздуха ( $\lambda > 1$ ) термин «бедная» смесь.

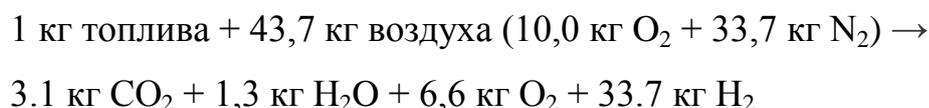
Массовый баланс полного, то есть идеального горения топлива выглядит следующим образом:

Для бензиновых двигателей ( $\lambda = 1$ ):



Углекислый газ и водород производятся в виде продуктов окисления, пропорция содержания азота остается неизменным.

Для дизельных двигателей ( $\lambda \approx 3$ ):



Доля азота в поступающем в двигатель воздухе проходит при сгорании без изменений. Дизельный двигатель работает с самовоспламенением относительно бедной смеси, так что помимо продуктов окисления - углекислого газа и воды, в выхлопных газах образуются соответствующее количество неиспользуемого кислорода, а также повышенное содержание азота.

## **2.4 Выводы по разделу обзор токсичных веществ в отработавших газах транспортных средств**

Условия, при которых образуются токсичные вещества в двигателе внутреннего сгорания различны. Образование угарного газа, углеводородов и углерода связано с химическими реакциями окисления топлива, протекающими как в процессе смесеобразования, так и при сгорании топлива во время

рабочего цикла двигателя. Образование оксидов азота связано с термическим характером и не связано с реакциями окисления топлива.

Основной причиной образования токсичных веществ в двигателе внутреннего сгорания является несовершенство смесеобразования, что приводит к неполному сгоранию топлива, а также загрязнение топлива различными примесями. В идеальном случае при полном сгорании топлива должны образовываться пары воды и углекислый газ, которые не относятся к токсичным веществам. Но получить идеальный процесс сгорания топлива на различных режимах работы двигателя или иметь идеально чистое топливо невозможно. Поэтому токсичные компоненты в отработавших газа всегда сопровождают работу двигателя внутреннего сгорания.

### 3 Альтернативные виды топлива

#### 3.1 Свойства альтернативных видов топлива

Физико-химические свойства нескольких видов топлива обобщены в таблице 3.1. Стехиометрическое соотношение воздух-топливо изменяется в зависимости от содержания энергии в топливе.

Соотношение воздух-топливо, необходимое для достижения оптимальных характеристик сгорания и теплового КПД, будет влиять как на рабочие параметры двигателя, так и на результирующий состав выхлопных газов.

Таблица 3.1 – Свойства горения различных видов топлива [9]

Свойства	Бензин	ДТ	Природный газ	Этанол	Ацетилен	Водород
Формула	$C_4-C_{12}$	$C_8-C_{20}$	$CH_4$	$C_2H_5OH$	$C_2H_2$	$H_2$
Плотность при 1атм, 20°С (Кг/м <sup>3</sup> )	720 – 780	820 – 860	0,65	809,9	1,092	0,08
Температура самовоспламенения (°С)	257	254	540	363	305	572
Стехиометрическая смесь (Кг/Кг)	14,7	14,5	17,2	9	13,2	34,3
Октановое число	95–97	–	105	89.7	45–50	130
Пределы воспламеняемости в воздухе (% объема)	1,4–7,6	0,6–5,5	5,3–15	3–19	2,5–81	4–74,5
Адиабатическая температура пламени (К)	2300	2200	2320	2193	2500	2400
Минимальная энергия воспламенения (МДж)	0,23	–	0,29	0,23	0,019	0,02
Максимальная скорость пламени (м/с)	0,5	0,3	0,42	0,61	1,5	3,5
Теплотворная способность (кДж/кг)	43	42,5	49,99	26,7	48,225	120

Для транспортных средств, работающих на природном газе, высокое стехиометрическое соотношение воздух-топливо означает, что при расходе воздуха, сравнимом с расходом воздуха в бензиновых двигателях, через камеру

сгорания будет протекать относительно низкое количество топлива, что ограничивает мощность, вырабатываемую двигателем.

### 3.2 Энергозатраты для производства альтернативных видов топлива

Топливо, используемое в двигателях внутреннего сгорания, как правило, производится из первичных ресурсов. Для преобразования источника в топливо и доведения этого топлива до транспортного средства проводится анализ с точки зрения потребления энергии и выбросов парниковых газов. Энергетические балансы и балансы парниковых газов, полученные в результате анализа на основе 2010-2020+ годов для альтернативных видов топлива в Евросоюзе, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Энергозатраты и выбросы углекислого газа при производстве альтернативного топлива

Топливо	Ресурсы	Затраченная энергия, МДж/МДж <sub>т</sub>	Выброс парниковых газов, г CO <sub>2</sub> /МДж <sub>т</sub>
Бензин	Нефть	0,18	13,8
Дизельное топливо	Нефть	0,2	15,4
Природный газ	ПГ Евросоюза	0,17	13,0
	Импортный ПГ (7000 км)	0,29	22,6
	Импортный ПГ (4000 км)	0,21	16,1
	Сжиженный природный газ	0,28	19,9
	Сланцевый газ	0,1	7,8
	Синтезированный с помощью ветрогенераторов	1,05	3,3
Этанол	Сахар	1,2	28,4
	Пшеница	1,31	55,6
	Другое	1,66	41,4
Водород	Природный газ	1,1	118
	Уголь	1,45	237
	Биомасса	1,05	14,6
	Электроэнергия	3,11	190

При исследовании таблицы 3.2 по видам топлива максимальная энергия расходуется на производство газообразного водорода, а минимальная - на бензиновое топливо. С другой стороны, если сравнить таблицу 3.2 с точки зрения ресурсов, то при использовании электролиза в производстве водорода наибольшее потребление энергии получается в размере 3,11 МДж, а наименьшее - в размере 0,1 МДж при производстве сланцевого газа. Согласно таблице 8, наибольшее значение  $\text{CO}_2$  образуется при получении газообразного водорода, а наименьшее значение выбросов - при производстве бензинового топлива. Что касается ресурсов, то в то время как самая высокая величина выбросов парниковых газов получается в виде 237 г  $\text{CO}_2/\text{МДж}$  при производстве водорода из угля, самая низкая величина выбросов парниковых газов составляет 3,3 г  $\text{CO}_2/\text{МДж}$  при производстве синтетического природного газа из энергии ветра. На примере данных Евросоюза и исходя из вышеуказанного, можно сделать вывод, что производство природного газа менее энергозатратное и экологически чистое по сравнению с другими видами альтернативного топлива.

### **3.3 Природный газ как альтернативное топливо для транспортных средств**

Природный газ — это ископаемое топливо, смесь газов, образовавшихся в недрах Земли при анаэробном разложении органических веществ. Стоимость добычи природного газа из природных ресурсов ниже, чем у других видов ископаемого топлива. Основу состава природного газа составляет метан с незначительным процентом содержания других газов. Подробный состав природного газа приведен в таблице 3.3.

В отличие от бензиновых и дизельных двигателей, двигатели внутреннего сгорания, работающие на природном газе, не требуют обогащения топлива при холодном запуске, а выбросы выхлопных газов не зависят от низких температур.

Таблица 3.3 – Состав природного газа

Компонент	Формула	Анализ, %	Диапазон, %
Метан	$\text{CH}_4$	94.7	87.0 - 98.0
Этан	$\text{C}_2\text{H}_6$	4,2	1.5 - 9.0
Пропан	$\text{C}_3\text{H}_8$	0.2	0.1 - 1.5
Изобутан	$\text{CH}(\text{CH}_3)_3$	0.02	От следов до 0.3
Бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	0.02	От следов до 0.3
Изопентан	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_3$	0.01	От следов до 0.04
Пентан	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	0.01	От следов до 0.04
Гексан	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	0.01	От следов до 0.06
Азот	$\text{N}_2$	0.5	0.2 - 5.5
Диоксид углерода	$\text{CO}_2$	0.3	0.05 - 1.0
Кислород	$\text{O}_2$	0.01	От следов до 0.1
Водород	$\text{H}_2$	0.02	От следов до 0.05

«По сравнению с другими видами углеводородного топлива метан производит меньше углекислого газа на каждую единицу выделенного тепла. При температуре около 891 кДж/моль теплота сгорания метана ниже, чем у любого другого углеводорода. Тем не менее, он производит больше тепла на массу (55,7 кДж/г), чем любая другая органическая молекула из-за его относительно большого содержания водорода, что составляет 55 % теплоты сгорания» [10].

### **3.4 Физико-химические свойства сжатого природного газа для двигателей внутреннего сгорания**

Согласно таблице 3.3, природный газ в силу своих физико-химических свойств удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к газовому топливу для автомобилей:

- обладает хорошей смешиваемостью с воздухом для образования однородной горючей смеси;
- имеет высокую калорийность горючей смеси и высокое октановое число (октановое число метана более 102-105 ед.), что не допускает детонационного сгорания в цилиндрах двигателя и позволяет использовать высокие степени сжатия;
- содержит минимальное количество веществ, вызывающих коррозию поверхностей двигателей, окисление и разжижение моторного масла в картере двигателя;
- обеспечивает минимальное образование токсичных и канцерогенных веществ в продуктах сгорания;
- обладает способностью сохранять стабильность компонентного состава, физико-химические и моторные свойства;
- имеет минимальное содержание смолистых веществ и механических примесей, способствующих нагарообразованию и загрязнению систем питания и зажигания двигателя.

К недостаткам природного газа следует отнести следующее:

- наличие низкого цитанового числа (цитановое число равно 10) и, следовательно, плохой воспламеняемости равной 680 °С по сравнению с нефтяным топливом (например, у бензина 330 °С);
- уменьшенная по сравнению с жидким нефтяным топливом скорость горения;
- меньшая плотность газовой среды по сравнению с плотностью воздуха.

### **3.5 Техничко-эксплуатационные показатели автотранспортных средств, работающих на сжатом природном газе**

Использование КПП на автотранспорте имеет ряд положительных качеств:

- отсутствие разжижения и уменьшение загрязнения моторного масла повышает срок его службы, в результате расход масла уменьшается на 10-15% по сравнению с бензиновыми двигателями;
- значительное снижение нагара на деталях цилиндропоршневой группы увеличивает моторесурс двигателя в среднем на 35-40%;
- срок службы свечей зажигания увеличивается на 40%;
- снижаются выбросы вредных веществ, особенно, с отработавшими газами, а также шумность работы двигателя;
- при работе двигателя автомобиля по газодизельному циклу в 3-4 раза уменьшается выброс твердых частиц с отработавшими газами и значительно снижается содержание канцерогенных веществ.

Наряду с положительными качествами перевод автотранспортных средств на КПП имеет и ряд недостатков:

- время разгона автомобиля увеличивается на 24-30%;
- максимальная скорость уменьшается на 5-6%;
- затруднена эксплуатация грузовых автомобилей с прицепом;
- дальность ездки на одной заправке газом не превышает 65% дальности ездки на одной заправке нефтяным топливом.

Из-за наличия дополнительной газобаллонной аппаратуры трудоемкость ТО и ТР увеличивается на 4-6%.

В зависимости от количества и массы баллонов высокого давления металлоемкость грузовых ГБА увеличивается на 400-900 кг и соответственно снижается их номинальная грузоподъемность; у легковых автомобилей уменьшается полезный объем багажного отделения.

Техническое обслуживание и ремонт газобаллонных автомобилей требует более высокой квалификации обслуживающего персонала и дополнительных затрат.

Указанные преимущества и недостатки КПГ как топлива для автотранспорта в известной мере определяют и область применения газобаллонных автомобилей.

Газобаллонные автомобили наиболее эффективны при внутригородских перевозках, при обслуживании предприятий торговли, быта, связи и других учреждений, когда сам характер перевозимых грузов не требует полностью использовать максимальную грузоподъемность автомобилей. Весьма эффективно использование КПГ для городских автобусов большого и особо большого класса, а также легковых автомобилей служебного пользования.

Применение газовых и газодизельных двигателей на магистральных тягачах и междугородних автобусах создает материальную основу для дальнейшего прогресса в решении задач по газификации автотранспортных средств и обеспечения высокой экологичности магистральных автомобильных перевозок грузов и пассажиров, в том числе для функционирования "голубых транспортных коридоров". [11]

### **3.6 Выводы по разделу альтернативные виды топлива**

В качестве альтернативных видов топлива рассматриваются: сжиженный нефтяной газ, природный газ и биометан, электричество, биотопливо и водород.

Наиболее перспективным альтернативным топливом является сжатый природный газ ввиду экологичности, меньшим выбросом токсичных веществ в атмосферу при аналогичных показателях производительности.

Так как запасы метана практически неограниченны, он очень дешев. Возможно переоборудование для работы на метане практически любых бензиновых двигателей (карбюраторных, инжекторных) и даже дизельных (хотя объем доработок последних существенно выше и это не всегда экономически целесообразно). Кроме традиционной добычи газа, метан можно

получать при переработке органических отходов (биогаз). Но при использовании метана в качестве моторного топлива возникает одна проблема - компактно его можно хранить только в сжатом виде под давлением в 250 атмосфер, для чего нужны очень прочные баллоны. Если делать их из стали, то придется возить с собой батарею баллонов весом до полутора тонн - такой балласт могут взять на борт только грузовики и автобусы, да и то ценой существенного уменьшения грузоподъемности.

#### 4 Обзор легковых транспортных средств на сжатом природном газе

«Широкое распространение метана в сравнении с другими альтернативными видами топлива обусловлено целым рядом факторов: относительно высокой доступностью газа и наличием хорошо развитой инфраструктуры, низкими производственными затратами, сопоставимостью характеристик с транспортными средствами, работающими на традиционном топливе (мощность, разгон, средняя скорость, расход топлива), низким уровнем загрязнения».

«В группе автомобилей, работающих на природном газе, традиционно выделяют:

- Специализированные автомобили, способные работать только на природном газе (dedicated): имеют один топливный бак и достаточно низкий вес конструкции, что повышает их грузоподъемность. Однако дальность пробега таких автомобилей меньше по сравнению с традиционными ТС из-за более низкой удельной энергоемкости природного газа;
- Двухтопливные автомобили, имеющие две отдельные топливные системы, что позволяет им работать как на природном газе, так и на бензине (bi-fuel): обладают большим кругом возможностей в отличие от специализированных автомобилей, однако это сказывается на сложности конструкции и грузоподъемности;
- Двухтопливные автомобили, работающие на природном газе и использующие дизельное топливо для запуска двигателя (dual-fuel).» [12]

«Сжиженный природный газ, как более дорогостоящий вариант по сравнению со сжатым природным газом (из-за способа получения и условий хранения), как правило, используется в транспортных средствах с большой грузоподъемностью. При этом в случае использования метана для заправки (как в виде КПГ, так и в виде СПГ) отсутствует необходимость внесения

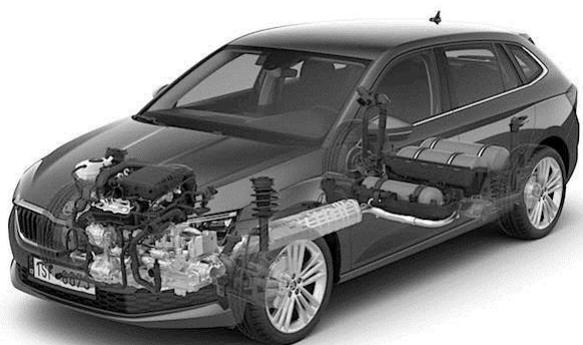
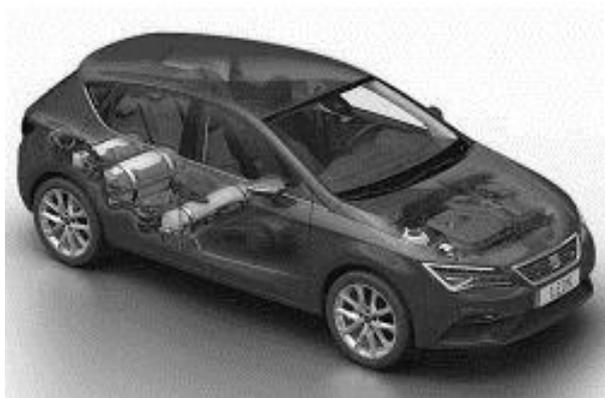
существенных изменений в конструкцию автомобилей, рассчитанных на применение бензина.

Это связано с тем, что принцип использования метана в качестве топлива во многом аналогичен применению бензина — воспламенение топливовоздушной смеси происходит за счет искры от свечи. Преобразования ограничиваются, главным образом, установкой и настройкой газобаллонного оборудования (ГБО).

В случае с дизельным двигателем топливовоздушная смесь воспламеняется от сжатия, а метан, в отличие от ДТ, не обладает подобным свойством. В этом случае возможны два варианта по использованию метана:

- Полный переход на газ — достигается за счет технически сложного и дорогостоящего переоборудования, в том числе двигателя;
- Переход на так называемый «газодизель» - технически менее сложная операция с сохранением возможности использования ДТ. Существенным недостатком является возможность замещения лишь 50% дизельного топлива в смеси и, соответственно, сокращение потенциальной выгоды». [13]

В настоящее время большинство автопроизводителей имеют в своей линейке продукции серийные автомобили, использующие в качестве топлива природный газ. На рисунках 4.1 и 4.2 приведены примеры серийно производимых легковых автомобилей, использующих природный газ.



Рисунки 4.1 и 4.2 – Серийно производимые автомобили, работающие на сжатом природном газе [14] [15]

Установка оборудования для сжатого природного газа требует рассмотрение вопроса о размещении одного или нескольких газовых баллонов, газового оборудования, безопасного расположения газовых магистралей и строгого соответствия установленным требованиям, которые регламентируются правилами ЕАК ООН №110 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения: I. Элементов специального оборудования механических транспортных средств, двигатели которых работают на сжатом природном газе (СПГ). II. Транспортных средств в отношении установки элементов специального оборудования официально утвержденного типа для использования в их двигателях сжатого природного газа (СПГ)»

#### **4.1 Обзор легковых автомобилей российского производства**

«В СССР эксперименты с природным газом и пропан-бутановой смесью в качестве топлива начались в конце 30-х годов 20-го века. Некоторые автомобили, работающие на сжатом или природном газе, выпускались серийно ограниченными партиями.

Сейчас сжатый природный газ считается более перспективным видом топлива, чем сжиженная пропан-бутановая смесь. Он дешевле, экологичнее и подходит для стран с холодным климатом. Однако перевод на метан пока дорогой и требует установки громоздких баллонов, выдерживающих давление в 200 атмосфер. Кроме того, сеть заправочных станций АГНКС, которую активно начали строить в советское время, по-прежнему развита слабо. Это главным образом и сдерживает переход автомобилей и коммерческого транспорта на метан, тогда как пропан-бутановых заправок в России существенно больше.»

Первые эксперименты с газовыми автомобилями начал Горьковский автозавод в 1977 году. выпуском небольшими партиями двухтопливных автомобилей «Волга» 24-07 и 24-17, работающие на сжиженном нефтяном газе и использующиеся в таксопарках.

АвтоВАЗ разрабатывал двухтопливные автомобили с конца 1990-х годов. В 2008 году была представлена Lada Priora CNG, работающая на метане. Газовые баллоны располагались в багажном отделении под фальшполом. Также разрабатывалась версия газового автомобиля Priora с увеличенным объёмом газовых баллонов и уменьшенным до 15 литров топливным баком. Автомобили должны были пойти в серийное производство в 2012 году, но этого не произошло в связи с низким интересом к автомобилю с газоиспользующим оборудованием.

Ульяновский автозавод начал выпуск автомобилей с пропан-бутановой установкой в конце 2010 года. Газовая опция предлагалась для автомобилей «Patriot», «Карго» и 39094 «Фермер». Запас хода на пропан-бутановых газовых баллонах составлял 320-500 км в зависимости от модели. Все УАЗы, работающие на газовом топливе, оснащались двигателем 4091 мощностью 112 л.с. и итальянским газобаллонным оборудованием Lovato. Газовые автомобили Ульяновского автозавода пользовались ограниченным спросом и в 2013 году их выпуск был прекращен.

Первым российским предприятием, запустившим серийное производство двухтопливных автомобилей, стал Горьковский автозавод. В 2010 году был запущен в серийное производство малотоннажный автомобиль «ГАЗель Бизнес» на сжиженном нефтяном газе, а затем в 2013 году появилась версия на сжатом природном газе. [16]

#### **4.2 Обзор легковых автомобилей Lada, работающих на сжатом природном газе**

В 2017 году АвтоВАЗ запустил в серийное производство автомобиль Lada Vesta CNG, работающий на сжатом природном газе, а затем в 2018 году универсал и фургон Largus CNG. Запас хода автомобилей составляет до 350 км при оснащении газовым баллоном 90 литров. Компоновка газового оборудования автомобилей Lada Vesta CNG и Lada Largus CNG представлена на рисунках 4.3 и 4.4.



Рисунок 4.3 – Компоненты автомобиля Lada Vesta CNG: 1. Заправочный штуцер; 2. Топливный бак (бензин); 3. Модуль впуска; 4. Газовая рампа; 5. Редуктор газовый; 6. Выпускная система; 7. Газовый баллон

«Металлокомпозитный газовый баллон для сжатого природного газа расположен за спинкой заднего сиденья и снабжен встроенным предохранителем и скоростными клапанами, исключающими возможность разрыва баллона и неконтролируемый выход газа при неисправности газопроводов.

Заправочное устройство для заполнения газом расположено с правой стороны автомобиля в лючке рядом с горловиной бензобака.» [17]

«В установке ГБО используются высококачественные компоненты от известных мировых производителей. Система топливоподачи использует фазированный впрыск топлива с регулируемой системой впуска четырьмя газовыми и четырьмя бензиновыми форсунками» [17]

На рисунках 4.5 и 4.6 представлены схемы расположения компонентов газобаллонного оборудования серийного автомобиля Lada Vesta CNG и Lada Largus CNG, выпускаемых АО «АВТОВАЗ».



Рисунок 4.4 – Компоненты автомобиля Lada Largus CNG: 1. Газовый баллон; 2. Редуктор газовый; 3. Газовая рампа; 4. Топливный бак (бензин) 5. Газовая магистраль высокого давления; 6. Заправочное устройство; 7. Кнопка переключения типа топлива: газ/бензин [18]

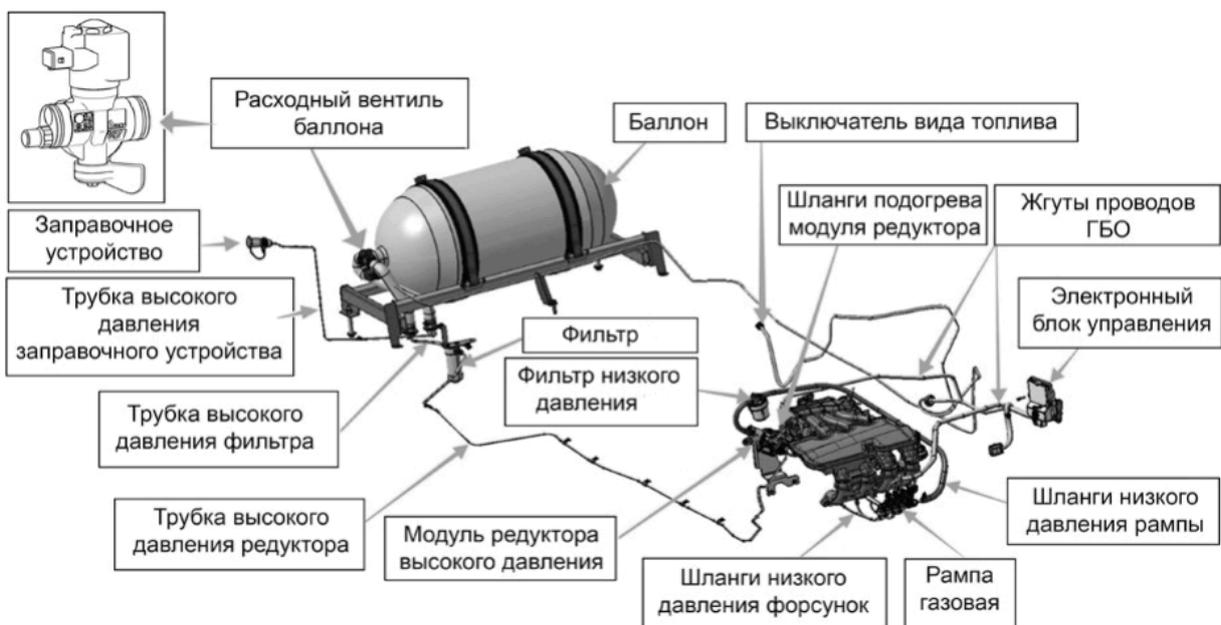


Рисунок 4.5 – Схема соединений элементов газобаллонного оборудования в автомобиле LADA Vesta CNG [19]

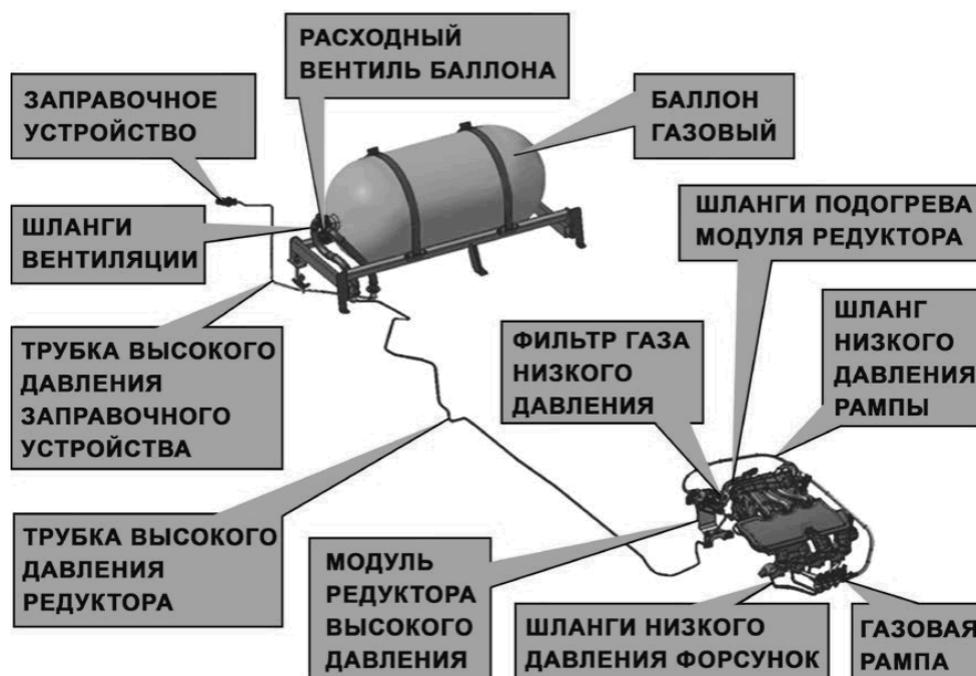


Рисунок 4.6 – Схема соединений элементов газобаллонного оборудования в автомобиле LADA Largus CNG [19]

Из сравнительного анализа двух схем оборудования автомобилей можно сделать вывод, что компоновка газового оборудования на автомобилях существенных отличий не имеет, за исключением наличия дополнительного электронного блока управления на Vesta CNG, что говорит о различной архитектуре управления газовым оборудованием.

Автомобили LADA CNG оснащены безальтернативным бензиновым двигателем ВАЗ-21129 с модифицированной системой впуска для использования газового топлива. В связи с широким распространением указанного двигателя в линейке продукции АО «АВТОВАЗ», в данной исследовательской работе будет проектироваться и анализироваться двигатель, близкий по характеристикам к двигателю ВАЗ-21129.

### 4.3 Обзор двигателя ВАЗ-21129

Современные автомобили Lada «Largus», Lada «Vesta» и Lada «X-Ray» производства АО «АВТОВАЗ» оснащаются шестнадцатиклапанным

двигателем ВАЗ-21129 мощностью 106 лошадиных сил и объемом 1,6 литра, преимущественно в начальных и средних комплектациях.

Подробные характеристики двигателя ВАЗ-21129 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики двигателя ВАЗ-21129 [20]

Объем двигателя, см <sup>3</sup>	1596
Мощность двигателя, л.с./ об. мин	106/5800
Крутящий момент, Н·м/ об. мин	148/4200
Тип	рядный
Количество цилиндров	4
Клапанов на цилиндр	4
Ход поршня, мм	75,6
Диаметр цилиндра, мм	82
Степень сжатия	10,5
Материал блока цилиндров	чугун
Система питания	инжектор
Топливо	92-95
Экологические нормы	Евро 5
Вес двигателя, кг	109
Годы выпуска	2015-н.в.
Расход топлива, л/100 км (для а/м Vesta)	
— город	9,0
— трасса	5,3
— смешан.	6,6
Расход масла, гр./1000 км	до 200
Объем масла в двигателе, л	3.2 (АМТ)
	4.4 (МКПП)

Внешняя скоростная характеристика двигателя ВАЗ-21129 представлена на рисунке 4.7.

Базовой моделью при создании двигателя послужил двигатель ВАЗ-21127, устанавливаемый на автомобили семейства «Granta». Основное отличие двигателя ВАЗ-21129 от предшественника состоит в использовании модернизированной впускной воздушной системы. С целью оптимизации работы двигателя внедрена система дополнительных заслонок для регулировки параметров впускного ресивера. С помощью заслонок впускной ресивер способен полноценно наполнять камеру сгорания в зависимости от оборотов коленчатого вала двигателя. При низких оборотах коленчатого вала воздух в впускном ресивере движется по длинному пути, при высоких оборотах по короткому пути. Переключение режимов заслонок выполняет блок управления. Вместо датчика массового расхода воздуха используется датчик абсолютного давления и датчик температуры воздуха.

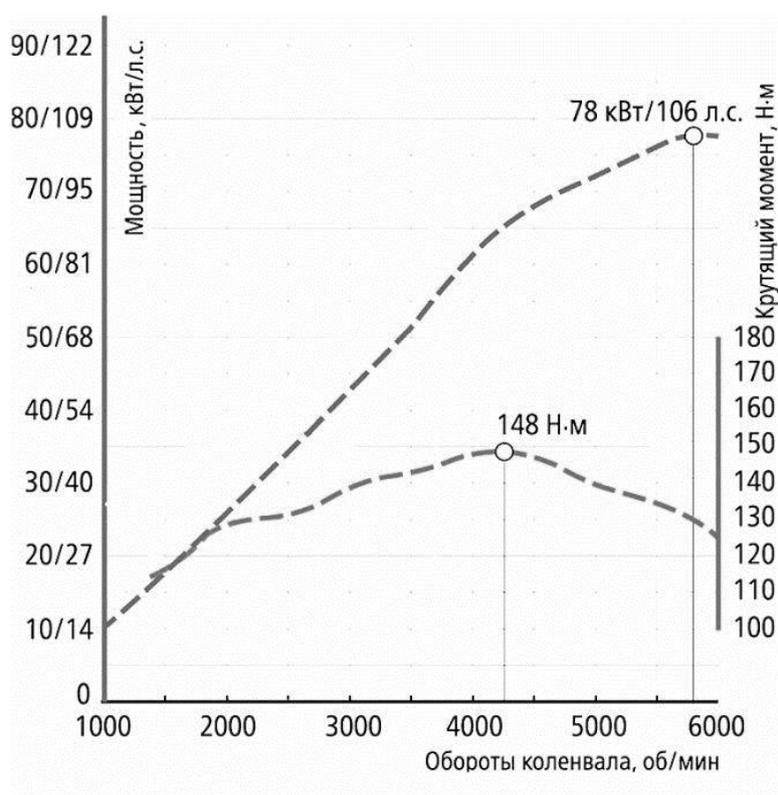


Рисунок 4.7 – Внешняя скоростная характеристика двигателя ВАЗ-21129 [21]

На основе вышеуказанных характеристик будет выполнено проектирование двигателя с показателями, близкими к двигателю ВАЗ-21129, а также произведен анализ токсичности двигателя на соответствие современным нормам токсичности – «Евро-5» для России, «Евро-6» для Европейского союза.

#### **4.4 Выводы по разделу обзор легковых транспортных средств на сжатом природном газе**

Серийные автомобили на природном газе выпускаются в двух вариантах исполнения: двухтопливные и монотопливные. Для перехода на природный газ автопроизводители используют имеющиеся бензиновые двигатели (двигатели с искровым зажиганием). Серийные автомобили на природном газе предлагают большинство автопроизводителей, в том числе Lada, УАЗ, ГАЗ, КамАЗ, Audi, BMW, Citroen, Chevrolet, Fiat, Ford, Honda, Hyundai, Mercedes-Benz, Opel, Peugeot, Seat, Skoda, Toyota, Volkswagen, Volvo. Автомобили реализуются в регионах, где использование природного газа наиболее распространено.

Газобаллонное оборудование для работы на сжатом природном газе объединяет систему питания газом и электронную систему управления. Состав газобаллонного оборудования для серийных и модифицированных автомобилей в основном идентичен и может иметь конструктивные различия в зависимости от конкретного производителя газобаллонного оборудования.



Расчет характеристик двигателя проводится в диапазоне оборотов коленчатого вала от 500 до 6000 об/мин с шагом в 500 об/мин (Case 1 - 12), начиная с максимального параметра, что обусловлено особенностями вычислительного комплекса.

### **5.1 Сравнение основных характеристик проектируемого бензинового двигателя с показателями двигателя ВАЗ-21129**

Проведена симуляция двигателя с заданными параметрами работы двигателя на бензине: обозначение топлива – «RON\_95», что соответствует параметрам бензина с октановым числом 95; Состав топлива, поступающего в топливные форсунки – «Liquid fuel» = 1 (жидкое топливо).

Все полученные данные симуляции силового агрегата на бензине представлены в приложении 1.

Ключевыми значениями сравнения проектируемого двигателя и двигателя ВАЗ-21129 являются показатели мощности и крутящего момента в определенных диапазонах оборотов коленчатого вала.

Результаты расчета отношения мощности к оборотам коленчатого вала двигателя представлены в таблице 5.1 и отображены на рисунке 5.2:

Таблица 5.1 – Мощность расчетного двигателя на заданных оборотах коленчатого вала при работе на бензине

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
Мощность, л.с	6,9	15,6	25,8	34,8	47,7	61,8	75,4	80,1	89,2	97,1	102,0	103,2

Согласно внешней скоростной характеристике двигателя ВАЗ-21129, представленной на рисунке 4.7, максимальная мощность 78кВт/106 л.с. достигается при оборотах коленчатого вала двигателя равными 5800 об/мин.

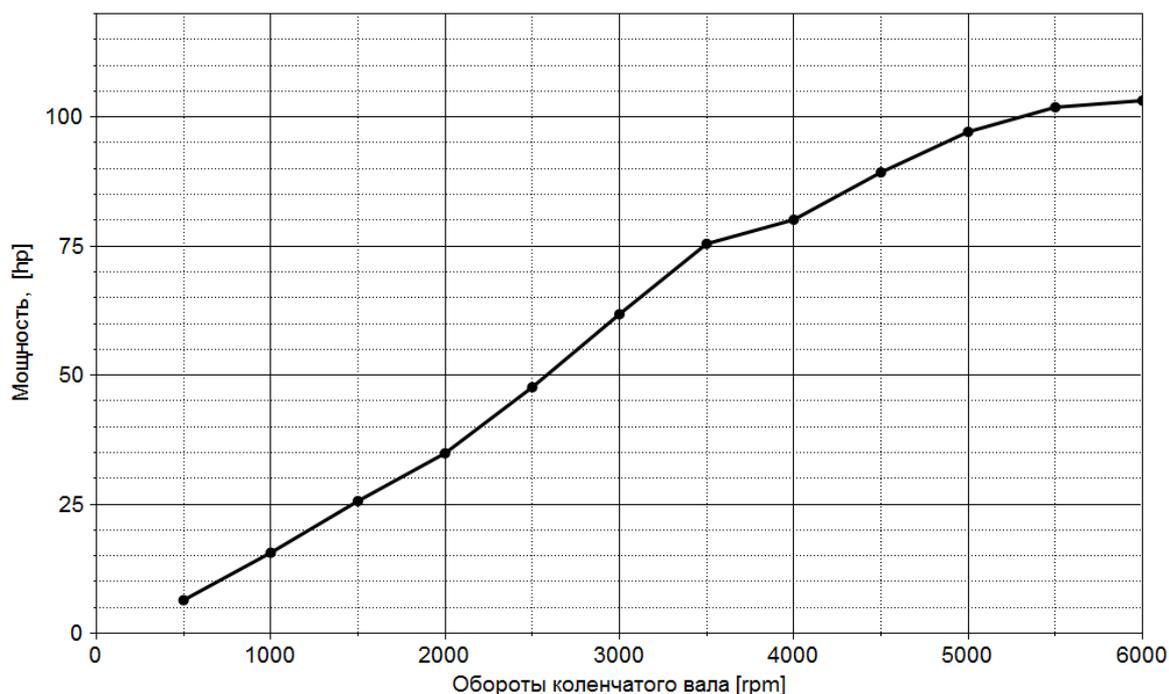


Рисунок 5.2 – График мощности двигателя в зависимости от оборотов коленчатого вала при работе на бензине

Согласно графику мощности проектируемого двигателя, представленного на рисунке 5.2, максимальная мощность двигателя в режиме 5800 об/мин коленчатого вала равна 103 л.с., что на 2,8% меньше мощности двигателя ВАЗ-21129. Приведенное значение и соответствие кривых на графиках мощностей позволяет считать построенный двигатель аналогом эталонного двигателя ВАЗ-21129.

Результаты симуляции отношения крутящего момента двигателя в зависимости от оборотов коленчатого вала представлены в таблице 5.2 и отображены на рисунке 5.3:

Таблица 5.2 – Крутящий момент двигателя на заданных оборотах коленчатого вала

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
Крутящий момент, Н·м	90.1	110.9	121.4	124	135.6	146.6	153.4	142.6	141.2	138.3	131.9	122.4

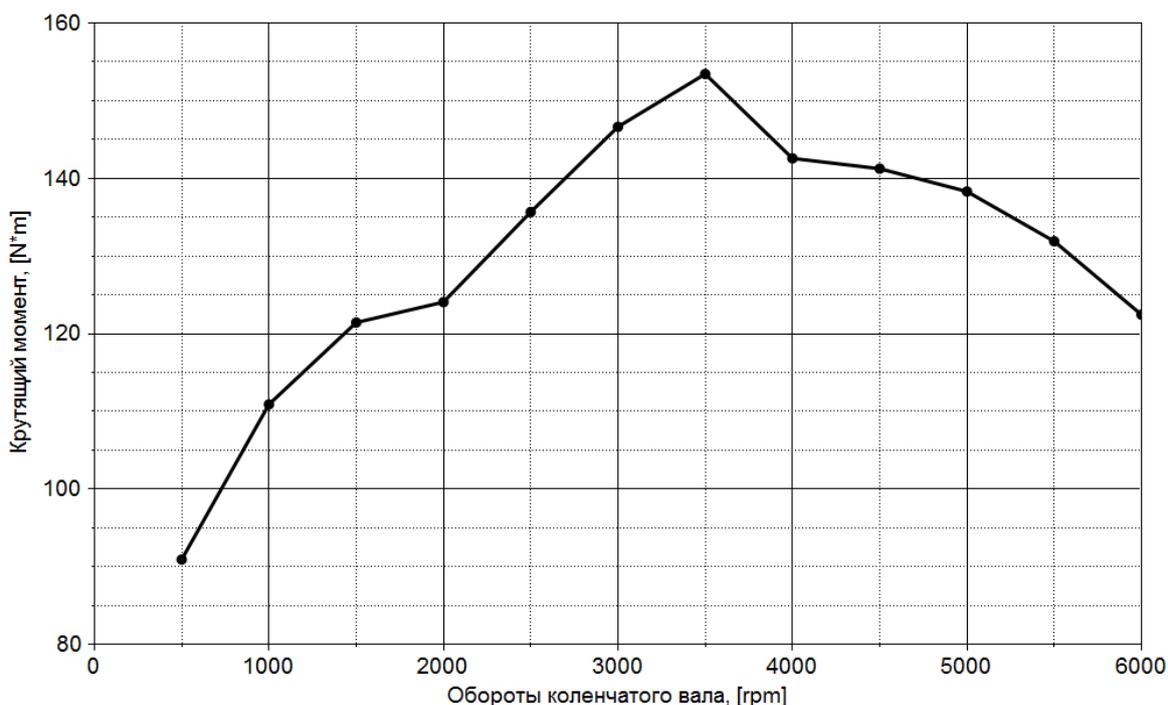


Рисунок 5.3 – График крутящего момента двигателя в зависимости от оборотов коленчатого вала при работе на бензине

Согласно внешней скоростной характеристике двигателя ВАЗ-21129, представленной на рисунке 4.7, максимальный крутящий момент в 148 Н·м достигается на оборотах коленчатого вала двигателя равными 4200 об/мин.

По результатам симуляции крутящего момента проектного двигателя, представленных на рисунке 5.3, максимальный крутящий момент в 153 Н·м достигается на оборотах коленчатого вала равными 3500 об/мин, что говорит об увеличении тяговых характеристик построенного силового агрегата на более низких режимах работы.

На основании вышеприведенных сравнительных расчетах построенного и эталонного двигателя, можно сделать вывод, что разработанный двигатель можно использовать для дальнейших расчетов токсичности на бензине, симуляции двигателя при использовании в качестве топлива сжатого природного газа, а также расчетов токсичности при использовании сжатого природного газа.

## 5.2 Соотношения токсичности ОГ

При проведении измерений токсичных веществ ( $\text{NO}_x$ , CO, CH и др.) и пересчета их концентраций [23][24] можно использовать соотношение

$$C_i \cdot 10^4 \text{ млн}^{-1} = C_i \cdot 2,24/\mu, \text{ мг/л}, \quad (4)$$

где  $C_i$  – концентрация вещества, %;

$\mu$  - молекулярная масса токсичного вещества, %

Значения  $\mu$  для токсичных веществ составляют:  $\text{NO}_x$  (приведенные к  $\text{NO}_2$ ) – 46, CO – 28, CH – 84. [25][26]

На основе вышеизложенного необходимо отметить, что

$$C_i, \% = 0,001 C_i, \text{ чнм (ppm)} \quad (5)$$

$$C_i, \% = 2,24 C_i/\mu, \text{ мг/л} \quad (6)$$

$$C_i, \text{ мг/л} = 0,0001\mu \cdot C_i/2,24, \text{ ppm} \quad (7)$$

При указании концентрации вредных веществ в процентах массовых (массовые %/%, массовое число граммов вещества в 100 граммах смеси) или объемных (% по объему/%, объемное число миллилитров вещества в 100 граммах смеси) допускается использовать соотношения:

$$\text{Мл/л} \rightarrow 10^{-1}\%, \text{ мл/м}^3 \rightarrow 10^{-4}\% \quad (8)$$

$$1 \text{ ppm} = 10^{-6} = 10^{-4} \%, \text{ объем.} \quad (9)$$

$$C, \%, \text{ объем.} = (V_m \cdot \rho, \%, \text{ объем.} / \mu \cdot 1000) \cdot 100 \quad (10)$$

$$\rho, \%, \text{ масс.} = 10 \cdot C, \%, \text{ объем.} \cdot \mu / V_m, \quad (11)$$

где  $V_m$  – объем грамм-молекулы, л;

$\mu$  - молекулярная масса компонента отработавших газов, г.

( $V_m = 22,41$  л при 760 мм рт.ст. и  $0^\circ\text{C}$ ;

$V_m = 24,12$  л при 760 мм рт.ст. и  $20^\circ\text{C}$ ).

Для расчета массовых выбросов токсичных веществ [27] при испытании автомобилей по методике испытаний ЕЭК ООН допустимо использовать уравнение

$$M = V_r \cdot \rho \cdot C \cdot 10^{-6}, \quad (12)$$

где  $M$  – масса вредного вещества, г;

$V_r$  – объем разбавленных отработавших газов, проходящих через систему отбора проб в процессе испытаний, л;

$\rho$  – плотность вредного вещества при нормальных условиях, г/л;

$C$  – объемная концентрация вредного вещества в отобранной пробе за вычетом концентрации вещества в разбавляющем воздухе, ppm ( $\text{млн}^{-1}$ ).

Для вредных веществ ( $\text{NO}_x$ , CO, CH) содержащихся в отработавших газах транспортных средств, плотность равна:

$$\rho_{CO} = 1,250 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{CH} = 3,884 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{NO_x} = 2.05 \text{ кг/м}^3$$

Объем  $V_r$  должен быть приведен к нормальным условиям:  $T = 293\text{K}$ ,  $p = 101,3\text{Кпа}$ .

Связь между количеством выбросов и их концентрациями можно ориентировочно определить по соотношениям:

для  $\text{NO}_x$  – 1 г/км = 432 ppm,

для CH – 1 г/км = 131 ppm,

для CO – 1 г/км = 0,07%. [28]

### **5.3 Расчет количества оксидов азота $\text{NO}_x$ в отработавших газах двигателя при работе на бензине**

Для точной обработки расчетов  $\text{NO}_x$ , которые сильно зависят от температуры, необходимо учитывать неоднородность температурного поля в камере сгорания. Таким образом, модель выбросов  $\text{NO}_x$  требует спецификации термодинамики горения в 2 зонах. В любой момент во время процесса сгорания в зону сгорания поступает поток массы, связанный с мгновенной скоростью сгорания топлива и стехиометрией добавочной сжигаемой массы. Модель  $\text{NO}_x$  назначает начальную концентрацию  $\text{NO}_x$  каждому пакету, представляющему быстрый и остаточный  $\text{NO}_x$ . Во время сгорания пакеты, которые сгорают в начале цикла, сжимаются в течение более длительного периода, так что они

достигают более высокой температуры, таким образом, внося больше NO<sub>x</sub>, чем те, которые сгорают позже. [29]

Модель NO<sub>x</sub> учитывает «быстрый» или «образующийся в пламени» NO, что связано с чрезмерно равновесной концентрацией радикалов (атом кислорода и гидроксильный радикал) в области пламени. Значение мгновенного NO получается из корреляции данных, которая дает отношение быстрого NO к равновесному NO как функцию отношения эквивалентности. Предполагается, что весь NO<sub>x</sub> находится в форме NO во время фазы быстрого образования, а также тепловой фазы, описанной ниже расширенными механизмами образования [30]:



Общая зона горения рассматривается как открытая стратифицированная система, в которой дальнейшее образование NO<sub>x</sub> происходит в зависимости от температуры, давления и коэффициента эквивалентности сгоревшего пакета [31].

Симуляция двигателя на содержание оксидов азота в отработавших газах представлена в таблице 5.3 и рисунке 5.4 в виде соотношения миллионных долей NO<sub>x</sub> к оборотам коленчатого вала двигателя.

Таблица 5.3 – Содержание оксидов азота в отработавших газах двигателя при работе на бензине

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
NO <sub>x</sub> , ppm	4633	4991	4867	4494	4424	4307	4291	3865	3890	3865	3955	3689

Для проведения анализа соответствия токсичности двигателя по показателю содержания оксидов азота установленным нормам, необходимо выполнить перевод единиц измерения из миллионных долей в миллиграмм на километр.

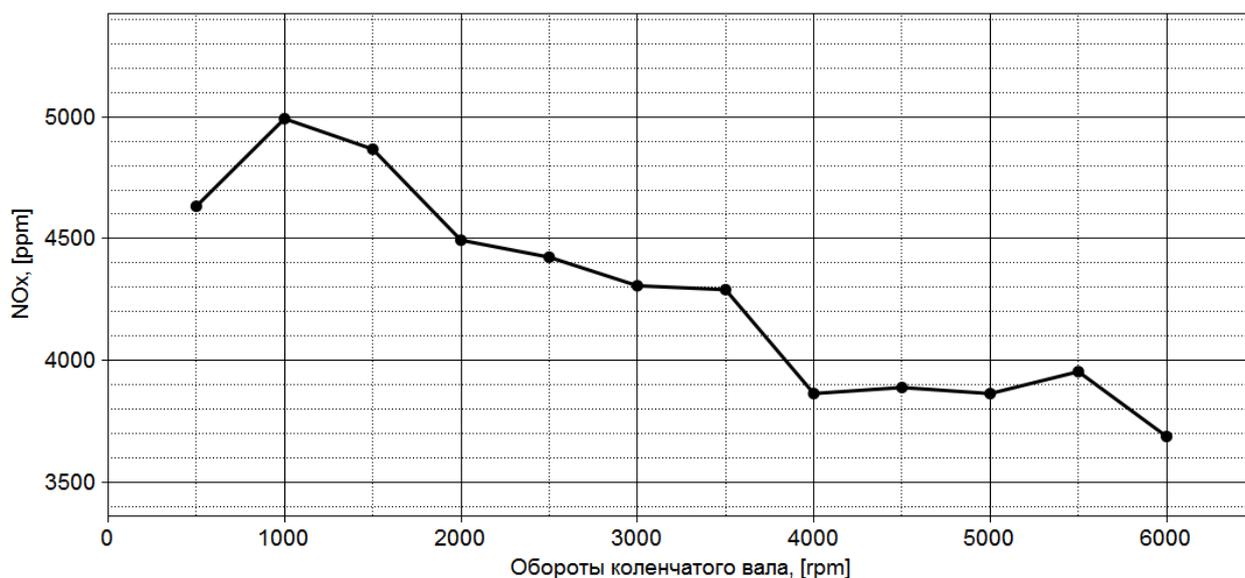


Рисунок 5.4 – Соотношение содержания оксидов азота в отработавших газах двигателя к оборотам коленчатого вала двигателя

Согласно правилам испытаний ЕАК ООН № 83, для имитации «состаренного» каталитического нейтрализатора, состояние которого эмитируется на пробеге 160000км, необходимо применить коэффициент ухудшения. Для компонентов NO<sub>x</sub> применяется коэффициент ухудшения равный 1,6. Установленные требования содержания NO<sub>x</sub> – не более 60 мг на километр пробега. Количество NO<sub>x</sub> приведено в таблице 5.3:

Таблица 5.3 – Расчет количества оксидов азота при работе двигателя на бензине и приведение к установленным нормам

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
NO <sub>x</sub> , ppm	4633	4991	4867	4494	4424	4307	4291	3865	3890	3865	3955	3689
NO <sub>x</sub> , мг/км	32,1	34,8	33,9	31,2	30,6	30,0	29,7	26,7	27,0	26,7	27,6	25,5
Среднее значение: 29,65 мг/км												
С коэффициентом ухудшения: 47,44 мг/км												
Требования ЕАК ООН № 83: 60 мг/км												

На основании проведенных расчетов из таблицы 5.3 следует, что расчетный двигатель, использующий в качестве топлива бензин с октановым

числом равным 95, соответствует современным нормам токсичности по количеству выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$ .

#### **5.4 Расчет количества угарного газа СО в отработавших газах двигателя при работе на бензине**

Для обедненного сгорания полный расчет равновесия недооценивает концентрацию СО в двигателе на несколько порядков. Для эффективного прогнозирования уровней выбросов концентрации СО пересчитываются параллельно с термодинамическим расчетом в цилиндре. При этом используется следующий алгоритм расчета:

На каждом этапе горения молярные доли одиннадцати видов WAVE рассчитываются для несгоревших и сгоревших зон на основе термодинамического равновесия и затем усредняются. Модель с одной зоной используется, когда заканчивается сгорание. Затем определяется угловое положение кривошипа, при котором молярная доля СО достигает своего максимального значения. [32]

Расчет двигателя на содержание оксидов азота в отработавших газах представлена в таблице 5.4 и рисунке 5.5 в виде соотношения миллионных долей угарного газа СО к оборотам коленчатого вала двигателя.

Таблица 5.4 – Содержание угарного газа в отработавших газах двигателя при работе на бензине

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
СО, ppm	415	1121	1713	2086	1607	1716	1856	1878	2006	2138	2925	3078

Для проведения анализа соответствия токсичности двигателя по показателю содержания угарного газа установленным нормам, необходимо выполнить перевод единиц измерения из миллионных долей в миллиграмм

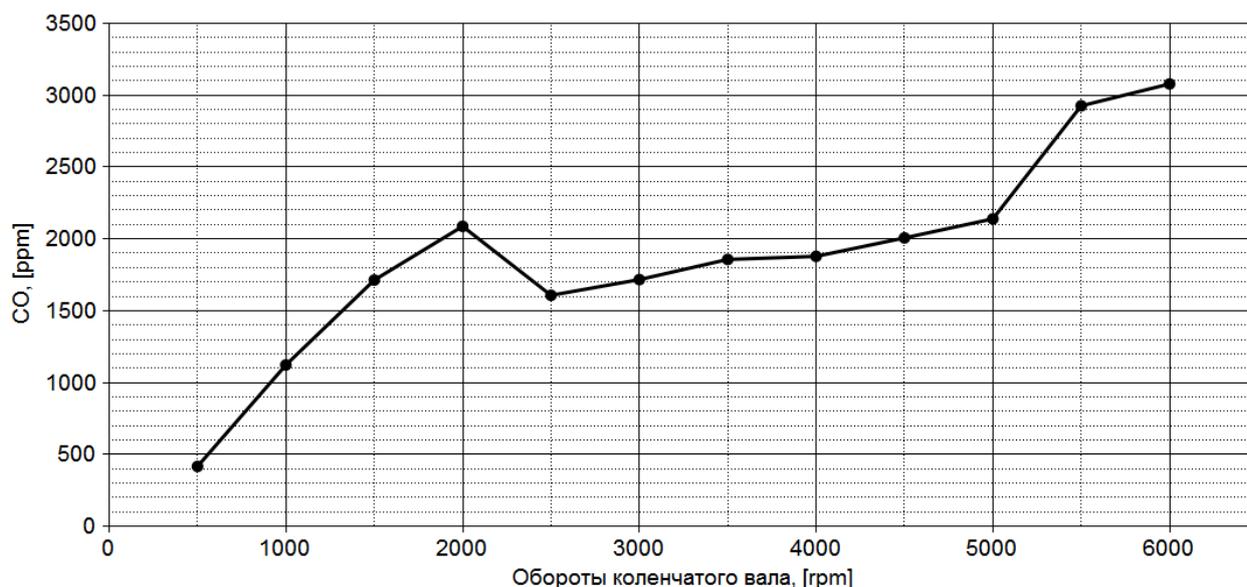


Рисунок 5.5 – Соотношение содержания угарного газа в отработавших газах двигателя к оборотам коленчатого вала двигателя

на километр. Также в расчете применяется коэффициент ухудшения, для компонентов CO равный 1,5.

Установленные требования содержания CO – не более 1000 мг на километр пробега. Расчет количества CO приведено в таблице 5.5:

Таблица 5.5 - Расчет количества угарного газа при работе двигателя на бензине и приведение к установленным нормам

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
CO, ppm	415	1121	1713	2086	1607	1716	1856	1878	2006	2138	2925	3078
CO, мг/км	103,6	280,3	428,25	521,5	401,8	429	464	469,5	501,5	534,5	731,25	769,5
Среднее значение: 469,6 мг/км												
С коэффициентом ухудшения: 704,4 мг/км												
Требования ЕАК ООН № 83: 1000 мг/км												

На основании проведенных расчетов из таблицы 5.5 следует, что расчетный двигатель, использующий в качестве топлива бензин с октановым числом равным 95, соответствует современным нормам токсичности по количеству выбросов угарного газа CO, при этом имеет существенный запас по уровню токсичности ниже установленных норм.

## 5.5 Расчет количества углеводородов СН в отработавших газах двигателя при работе на бензине

Модель выбросов НС для двигателей с искровым зажиганием подразумевает образование углеводородов во время сгорания и выпуска в элементе цилиндра двигателя, а также в системе отработавших газов. [33]

В отличие от большинства подмоделей производства выбросов WAVE в цилиндрах, эта подмодель функционирует непрерывно внутри и снаружи цилиндра двигателя, позволяя непрерывно протекать реакциям окисления после пламени на протяжении всей модели WAVE, пока температура остается выше пороговой.

Расчет двигателя на содержание углеводородов НС в отработавших газах представлен в таблице 5.6 и рисунке 5.6 в виде соотношения миллионных долей углеводородов НС к оборотам коленчатого вала двигателя.

Таблица 5.6 – Содержание углеводородов НС в отработавших газах двигателя при работе на бензине

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
НС, ppm	1448	1735	1955	2067	2162	2150	2216	2356	2422	2497	2645	2758

Для проведения анализа соответствия двигателя установленным нормам токсичности по показателю содержания углеводородов НС, необходимо выполнить перевод единиц измерения из миллионных долей в миллиграмм на километр. В расчете применяется коэффициент ухудшения, для компонентов НС равный 1,3. Установленные требования содержания углеводородов – не более 100 мг на километр пробега. Расчет количества углеводородов в отработавших газах приведен в таблице 5.7:

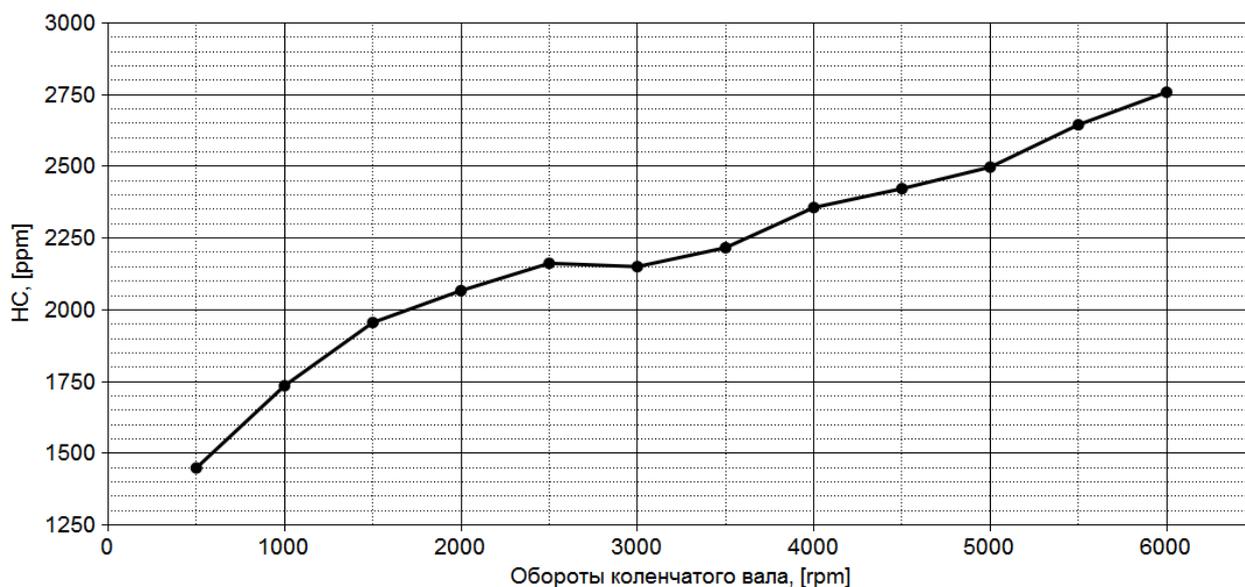


Рисунок 5.6 – Соотношение содержания углеводородов в отработавших газах двигателя к оборотам коленчатого вала двигателя при работе на бензине

Таблица 5.7 – Расчет количества углеводородов НС в отработавших газах двигателя при работе на бензине

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
НС, ppm	1448	1735	1955	2067	2162	2150	2216	2356	2422	2497	2645	2758
НС, мг/км	16,1	19,3	21,7	23,0	24,0	24,0	24,6	26,2	26,9	27,7	29,4	30,6
Среднее значение: 24,46 мг/кг												
С коэффициентом ухудшения: 31,8 мг/км												
Требования ЕАК ООН № 83: 100 мг/км												

На основании вышеизложенного, можно сделать вывод, что двигатель, работающий на бензине, соответствует установленным нормам токсичности по выбросам углеводородов НС при этом имеет существенный запас по уровню токсичности ниже установленных норм.

## 5.6 Сравнение основных характеристик двигателя на сжатом природном газе с показателями бензинового двигателя

Проведена симуляция двигателя с установленными параметрами работы двигателя на сжатом природном газе: Параметр «Compressibility» (сжимаемость) – «Real gas» (реальный газ), обозначение топлива – «Natural gas» (природный газ). Состав топлива, поступающего в топливные форсунки – «Vaporized fuel» = 1 (Испаряемое топливо).

Все полученные данные симуляции силового агрегата на сжатом природном газе представлены в приложении 2.

Для анализа изменения характеристик при переводе силового агрегата на сжатый природный газ, проводится сравнение мощности и крутящего момента расчетного двигателя с переключением типа топлива в программном комплексе «Wave Ricardo». Конструктивные изменения двигателя на бензине и сжатом природном газе в процессе проведения эксперимента не учитываются.

Результаты расчета отношения мощности к оборотам коленчатого вала двигателя представлены в таблице 5.8 и отображены на рисунке 5.7:

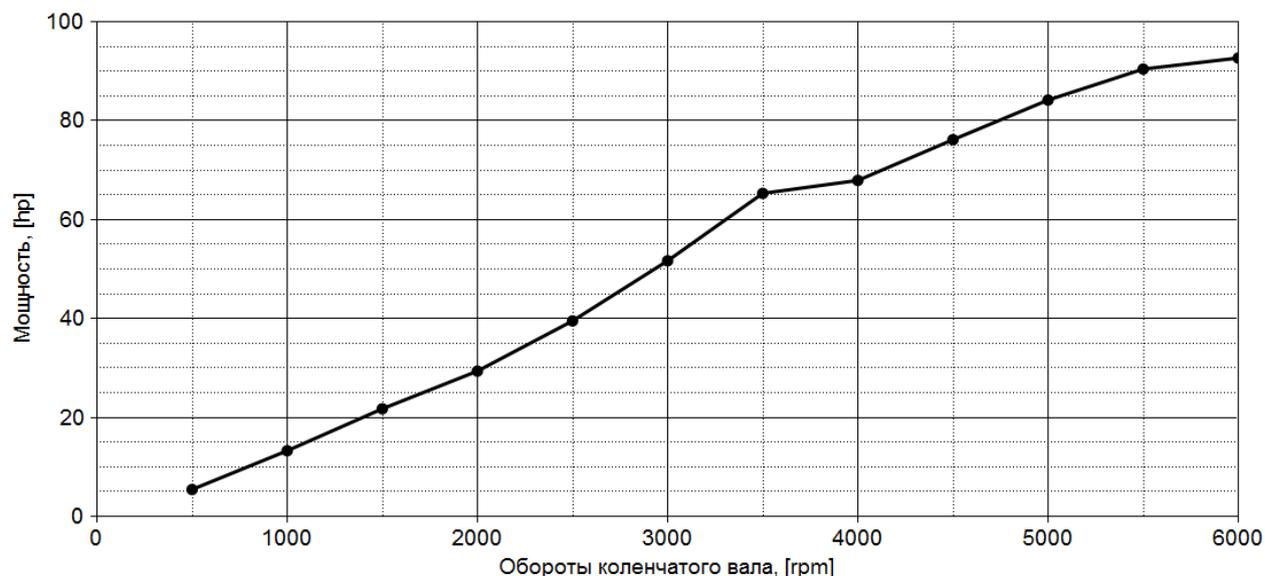


Рисунок 5.7 – График мощности двигателя в зависимости от оборотов коленчатого вала при работе на сжатом природном газе

Таблица 5.8 – Мощность расчетного двигателя на заданных оборотах коленчатого вала при работе на бензине

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
Мощность, л.с.	5,4	13,2	21,7	29,3	39,5	51,6	65,3	67,9	76,1	84,1	90,4	92,6

Согласно полученным данным симуляции работы двигателя на сжатом природном газе, при оборотах коленчатого вала равным 5800 об/мин, мощность двигателя достигает показателя 92 л.с. Бензиновый двигатель при таких же оборотах коленчатого вала имеет показатель в 103 л.с. Тем самым, переход двигателя с бензина на сжатый природный газ приводит к снижению мощности на 10,7%.

Результаты симуляции отношения крутящего момента двигателя в зависимости от оборотов коленчатого вала представлены в таблице 5.9 и отображены на рисунке 5.8.

Таблица 5.9 – Крутящий момент двигателя на заданных оборотах коленчатого вала при работе на сжатом природном газе

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
Крутящий момент, Н·м	76,9	94,2	103,1	104,5	112,5	122,6	132,8	120,9	120,5	119,8	117,0	109,9

Согласно полученным данным, силовой агрегат, работающий на сжатом природном газе, при 3500 оборотах коленчатого вала достигает показателя крутящего момента в 133 Н·м. Крутящий момент двигателя, работающего на бензине, в режиме 3500 об/мин составляет 153 Н·м. Это значит, что при переходе с бензина на сжатый природный газ снижение крутящего момента составляет 13%.

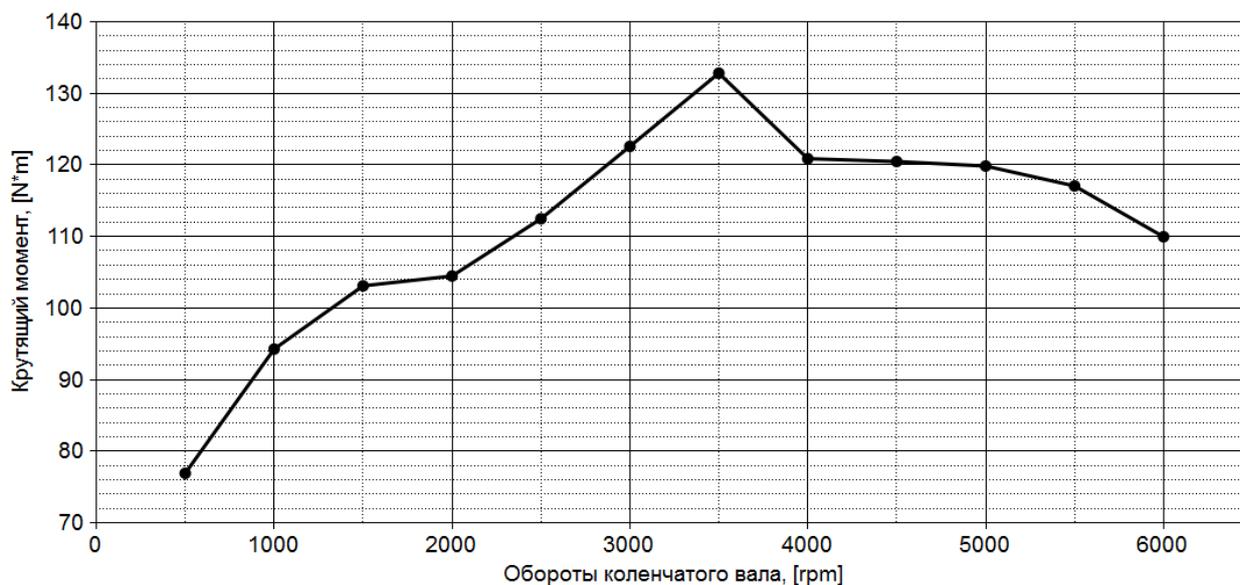


Рисунок 5.8 – График крутящего момента двигателя в зависимости от оборотов коленчатого вала при работе на сжатом природном газе

Приведенные процентные значения показывают фактическое снижение динамических показателей двигателей при переходе с бензинового топлива на использование сжатого природного газа.

Для подтверждения сделанного вывода и исключения возможной ошибки в расчетах модели двигателя, ниже приводится сравнение динамических характеристик серийно выпускающихся автомобилей в модификациях с бензиновым двигателем и двигателем, работающим на сжатом природном газе.

### **5.7 Анализ и сравнение динамических характеристик двигателей автомобилей Lada Vesta и Lada Vesta CNG**

Для проведения анализа процентного изменения динамических характеристик двигателя при переходе с бензинового топлива на сжатый природный газ, в работе рассмотрен автомобиль Lada Vesta с серийно устанавливаемым двигателем 1,6 литра и автомобиль Lada Vesta CNG с двигателем 1,6 литра с модифицированной системой впуска для работы на

сжатом природном газе – подача газа во впускной тракт каждого цилиндра с электронным управлением.

Сравнительные динамические характеристики автомобилей приведены в таблице 5.10 [34] [35] [36].

Таблица 5.10 – Динамические характеристики автомобилей Lada Vesta и Lada Vesta CNG

Автомобиль	Максимальная мощность, кВт (л.с.)/об.	Максимальный крутящий момент, Н·м / об.	Время разгона 0-100 км/ч, с	Расход топлива: смешанный цикл
Vesta	78 (106)/5800	148/4200	11,2	6,9 л/100км
Vesta CNG	70,5 (96)/5800 (газ)	135 /4200 (газ)	12,9 (газ)	6,3 м <sup>3</sup> /100км

При сравнительном анализе максимальной мощности двигателей автомобилей процентное снижение мощности при переходе с бензина на сжатый природный газ составляет 9,4% при 5800 об/мин коленчатого вала.

При анализе данных по максимальному крутящему моменту двигателей на 4200 об/мин коленчатого вала, процентное снижение при переходе с бензина на сжатый природный газ составляет 8,8%.

Приведенные процентные значения при анализе серийно выпускающихся автомобилей повторно доказывают снижение динамических характеристик при использовании сжатого природного газа в качестве альтернативного топлива.

## **5.8 Расчет количества оксидов азота NO<sub>x</sub> в отработавших газах двигателя при работе на сжатом природном газе**

Симуляция двигателя на количество оксидов азота в отработавших газах при работе на сжатом природном газе представлена в таблице 5.11 и рисунке 5.9 в виде соотношения миллионных долей NO<sub>x</sub> к оборотам коленчатого вала двигателя.

Таблица 5.11 – Содержание оксидов азота в отработавших газах двигателя при работе на сжатом природном газе

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
NO <sub>x</sub> , ppm	1440	1543	1533	1444	1347	1237	1279	1140	1160	1204	1239	1218

Для проведения анализа соответствия токсичности двигателя по показателю содержания оксидов азота установленным нормам, необходимо выполнить перевод единиц измерения из миллионных долей в миллиграмм на километр. Согласно правилам испытаний ЕАК ООН № 83, для имитации «состаренного» каталитического нейтрализатора для газовых двигателей также необходимо применять коэффициент ухудшения. Для компонентов NO<sub>x</sub> применяется коэффициент ухудшения равный 1,6.

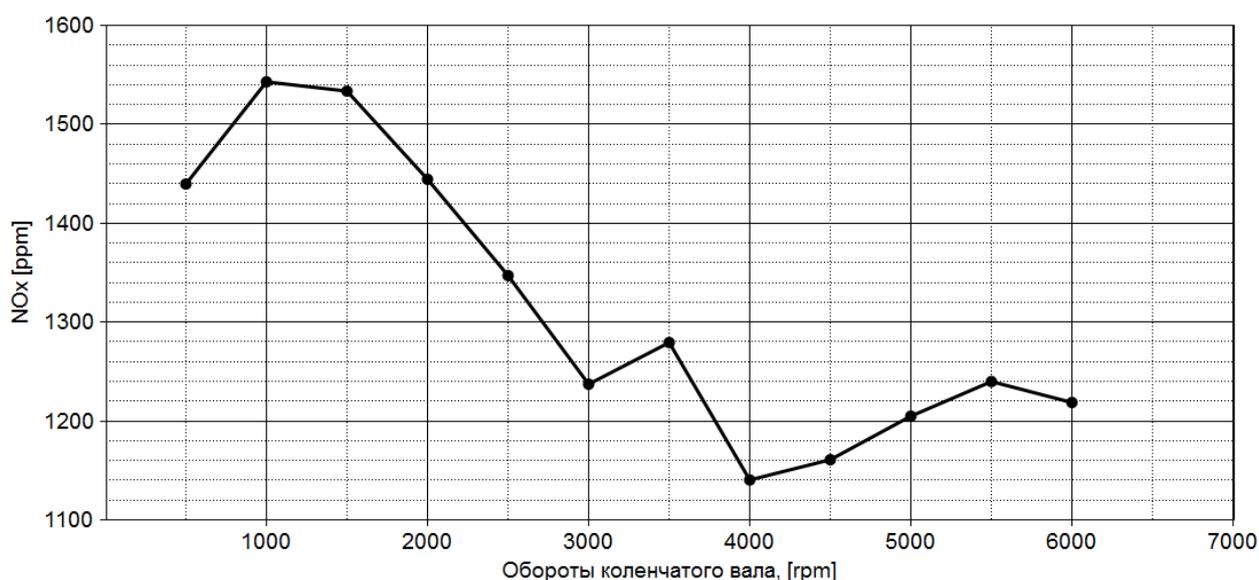


Рисунок 5.9 – Соотношение содержания оксидов азота в отработавших газах двигателя к оборотам коленчатого вала двигателя при работе на сжатом природном газе

Установленные требования содержания NO<sub>x</sub> – не более 60 мг на километр пробега. Количество NO<sub>x</sub> приведено в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Расчет количества оксидов азота при работе двигателя на сжатом природном газе и приведение к установленным нормам

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
NO <sub>x</sub> , ppm	1440	1543	1533	1444	1347	1237	1279	1140	1160	1204	1239	1218
NO <sub>x</sub> , мг/км	10	10,7	10,6	10,0	9,4	8,6	8,9	7,9	8,0	8,4	8,6	8,5
Среднее значение: 9,13 мг/км												
С коэффициентом ухудшения: 14,6 мг/км												
Требования ЕАК ООН № 83: 60 мг/км												

На основании проведенных расчетов из таблицы 5.12 следует, что двигатель, использующий в качестве топлива сжатый природный газ, соответствует современным нормам токсичности по количеству выбросов оксидов азота NO<sub>x</sub>. Аналогичный силовой агрегат, потребляемый в качестве топлива бензин, имеет среднее значение выбросов NO<sub>x</sub> равное 47,44 мг/кг с учетом коэффициента ухудшения. Исходя из этого, силовой агрегат на сжатом природном газе выделяет на 69 % токсичных выбросов NO<sub>x</sub> меньше в сравнении с бензиновым аналогом.

### **5.9 Расчет количества угарного газа СО в отработавших газах двигателя при работе на сжатом природном газе**

Расчет двигателя на содержание оксидов азота в отработавших газах при работе на сжатом природном газе представлен в таблице 5.13 и на рисунке 5.10 в виде соотношения миллионных долей угарного газа СО к оборотам коленчатого вала двигателя.

Таблица 5.13 – Содержание угарного газа в отработавших газах двигателя при работе на сжатом природном газе

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
СО, ppm	10624	13466	14482	14974	15288	15453	15572	15323	15337	15361	15348	15213

Для анализа соответствия токсичности двигателя по показателю содержания угарного газа установленным нормам, необходимо выполнить перевод единиц измерения из миллионных долей в миллиграмм на километр. Также необходимо учитывать коэффициент ухудшения для компонентов CO, который равен 1,5, согласно требованиям ЕАК ООН № 83, при этом указанные нормы регламентируют содержание CO не более 1000 мг на километр пробега. Расчет количества CO при работе силового агрегата на сжатом природном газе приведен в таблице 5.14.

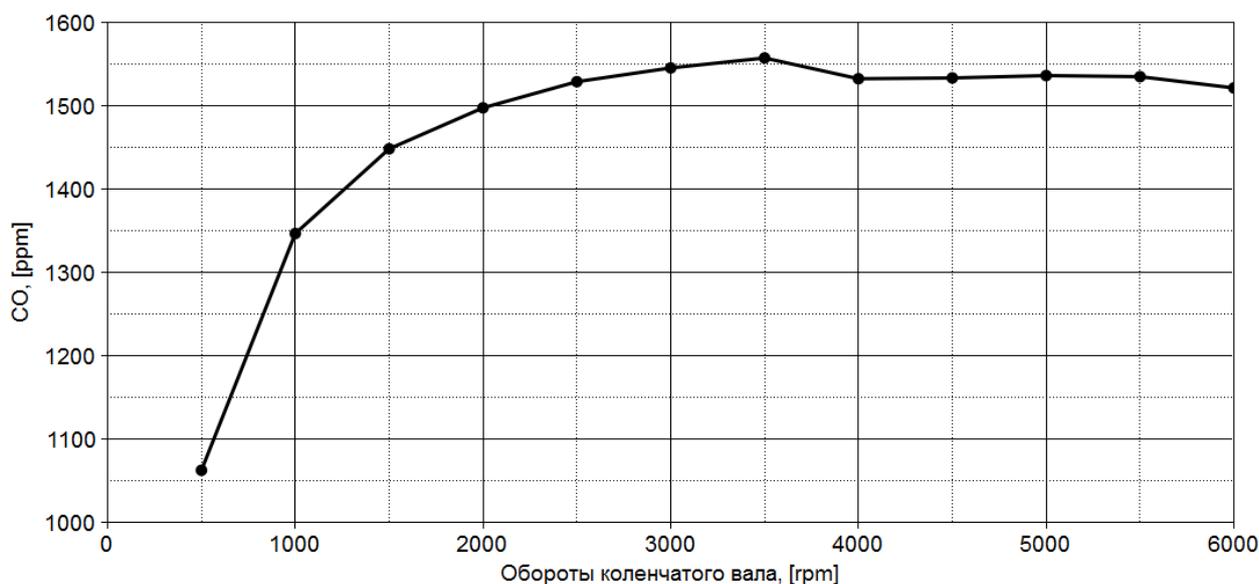


Рисунок 5.10 – Соотношение содержания угарного газа в отработавших газах двигателя к оборотам коленчатого вала при работе на сжатом природном газе

Таблица 5.14 - Расчет количества угарного газа при работе двигателя на сжатом природном газе и приведение к установленным нормам

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
CO, ppm	1062	1347	1448	1497	1529	1545	1557	1532	1533	1536	1535	1521
CO, мг/км	265,5	336,75	362	374,6	382,3	386,3	389,6	383	383,3	384	383,8	380,3
Среднее значение: 367,6 мг/км												
С коэффициентом ухудшения: 551,4 мг/км												
Требования ЕАК ООН № 83: 1000 мг/км												

На основании расчетов, приведенных в таблице 5.14, следует, что двигатель, работающий на сжатом природном газе, соответствует современным нормам токсичности по количеству выбросов угарного газа СО. Бензиновый силовой агрегат при схожих условиях выделяет 704,4 миллиграмм выбросов угарного газа на километр пробега с учетом коэффициента ухудшения [37] [38]. Исходя из этого, двигатель, работающий на сжатом природном газе, вырабатывает на 21,7% выбросов СО ниже бензинового аналога.

### **5.10 Расчет количества углеводородов СН в отработавших газах двигателя при работе на бензине**

Расчет выбросов отработавших газов двигателя, работающего на сжатом природном газе, на содержание углеводородов НС представлен в таблице 5.15 и рисунке 5.11 в виде соотношения миллионных долей углеводородов НС к оборотам коленчатого вала двигателя.

Таблица 5.15 – Содержание углеводородов НС в отработавших газах двигателя при работе на сжатом природном газе

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1150	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
НС, ppm	2930	2817	2810	2733	2782	2789	2938	2947	3004	3058	3141	3202

Для проведения анализа соответствия двигателя установленным нормам токсичности по показателю содержания углеводородов НС, необходимо выполнить перевод единиц измерения из миллионных долей в миллиграмм на километр. В расчете применяется коэффициент ухудшения, для компонентов НС равный 1,3.

Установленные требования содержания углеводородов – не более 100 мг на километр пробега. Расчет количества углеводородов в отработавших газах приведен в таблице 5.16:

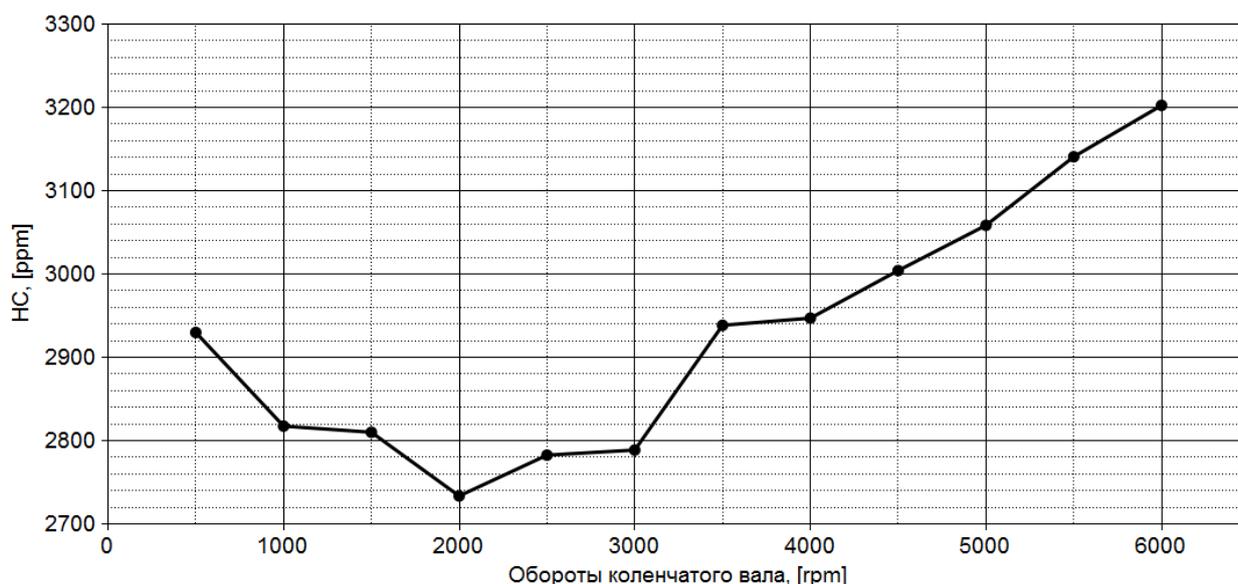


Рисунок 5.11 – Соотношение содержания углеводородов в отработавших газах двигателя к оборотам коленчатого вала двигателя при работе на сжатом природном газе

Таблица 5.16 - Соотношение содержания углеводородов в отработавших газах двигателя к оборотам коленчатого вала двигателя при работе на сжатом природном газе

Обороты коленчатого вала, об/мин	500	1000	1150	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
HC, ppm	2930	2817	2810	2733	2782	2789	2938	2947	3004	3058	3141	3202
HC, мг/км	32,6	31,3	31,2	30,7	30,9	31,0	32,6	32,7	33,4	34,0	34,9	35,6
Среднее значение: 32,6 мг/км												
С коэффициентом ухудшения: 42,4 мг/км												
Требования ЕАК ООН № 83: 100 мг/км												

Согласно приведенным расчетам, силовой агрегат, работающий на сжатом природном газе, соответствует установленным нормам токсичности по выбросам углеводородов HC. Бензиновый аналог при одинаковых условиях вырабатывает 31,8 миллиграммов выбросов углеводородов на километр пробега транспортного средства с коэффициентом ухудшения. Двигатель, работающий на сжатом природном газе, производит на 23,5% больше выбросов

углеводородов HC в сравнении с бензиновым аналогом, но его показатель токсичности в пределах нормы.

### **5.11 Выводы по разделу проектирование и расчет двигателя в программном комплексе «Wave Ricardo»**

В результате симуляции двигателя на бензине наблюдается снижение мощности на 2,8% расчетного двигателя относительно эталонного ВАЗ-21129 – 103 л.с. при 5800 об./мин. и 106 л.с. при 5800 об./мин. соответственно. При этом происходит увеличение крутящего момента на более низких оборотах коленчатого вала – 153 Н·м при 3500 об/мин у расчетного двигателя и 148 Н·м при 4200 об/мин у двигателя ВАЗ-21129.

При изменении в расчетной модели вида топлива с бензина на сжатый газ наблюдается снижение мощности двигателя на 10,7% - с 103 л.с. до 92 л.с. при 5800 об/мин коленчатого вала. Также снижается на 13% крутящий момент двигателя – с 153 Н·м до 133 Н·м при 3500 об/мин коленчатого вала.

При работе на бензиновом топливе исследования по содержанию вредных веществ показали следующие результаты:

- Количество оксидов азота  $\text{NO}_x$ :  
Среднее значение: 29,65 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 47,44 мг/км;  
Установленные нормы: 60 мг/км;
- Количество угарного газа CO:  
Среднее значение: 469,6 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 704,4 мг/км;  
Установленные нормы: 1000 мг/км.
- Количество углеводородов HC:  
Среднее значение: 24,46 мг/кг;  
С коэффициентом ухудшения: 31,8 мг/км;  
Установленные нормы: 100 мг/км.

При работе на сжатом природном газе исследования по содержанию вредных веществ показали следующие результаты:

- Количество оксидов азота  $\text{NO}_x$ :  
Среднее значение: 9,13 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 14,6 мг/км;  
Установленные нормы: 60 мг/км;  
Снижение выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  на 69%.
- Количество угарного газа  $\text{CO}$ :  
Среднее значение: 367,6 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 551,4 мг/км;  
Установленные нормы: 1000 мг/км;  
Снижение выбросов угарного газа  $\text{CO}$  на 21,7%.
- Количество углеводородов  $\text{HC}$ :  
Среднее значение: 32,6 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 42,4 мг/км;  
Установленные нормы: 100 мг/км;  
Снижение выбросов углеводородов  $\text{HC}$  на 23,5%

Анализ количества основных компонентов токсичных веществ в отработавших газах расчетного двигателя при работе на бензине и на сжатом природном газе показал соответствие современным нормам токсичности.

## Заключение

В работе рассмотрены современные нормы токсичности бензиновых двигателей внутреннего сгорания, приведен анализ действующих экологических норм в Российской Федерации и Европейском союзе, регулирующие содержание вредных выбросов в отработавших газах бензиновых двигателей. Проведен детальный анализ состава отработавших газов двигателей с подробным описанием ключевых токсичных компонентов и природой процесса их образования при работе силового агрегата.

В исследовании проведен анализ видов альтернативного топлива, физико-химических свойств и процессов их горения, приведены затраты на производство перспективных топлив для двигателей транспортных средств. Основное внимание уделено сжатому природному газу как одному из наиболее перспективных альтернативных топлив, рассмотрены его физико-химические свойства, приведены положительные и отрицательные стороны использования природного газа в качестве топлива в транспортных средствах. Выполнен обзор легковых автомобилей, работающих на сжатом природном газе и производимых серийно, в частности подробно разобраны конструкция и технические характеристики автомобилей Lada, работающих на сжатом природном газе, и их двигателей.

Для проведения анализа токсичности двигателя, работающего на сжатом природном газе, была спроектирована виртуальная модель рядного шестнадцати клапанного двигателя с расчетами системы впуска, газораспределительного механизма, шатунно-поршневой группы и системы выпуска. Выполнены измерения содержания основных токсичных веществ ( $\text{NO}_x$ , CO, HC) выхлопных газов виртуальной модели двигателя при работе на бензине и сжатом природном газе, выполнен сравнительный анализ двух режимов работы двигателя.

Результаты исследования показали, что использование сжатого природного газа в качестве альтернативного топлива ведет к значительному

сокращению выбросов токсичных веществ при работе двигателя и соответствию современным нормам токсичности, принятым в Российской Федерации и Европейском союзе. При этом применение сжатого природного газа обеспечивает безопасность при использовании на автотранспортных средствах и увеличение их технико-эксплуатационных характеристик при незначительном снижении динамических характеристик.

Основные выводы по разделам:

### **Выводы по разделу 1**

Для улучшения экологической ситуации в мире были введены специальные экологические стандарты, характеризующие все транспортные средства согласно количеству токсичных веществ, выбрасываемых ими в атмосферу. На сегодняшний день на территории Российской Федерации, начиная с 2016 года, действует экологический стандарт «Евро-5».

Градация автомобильного транспорта по экологическим классам и установленные максимальные нормы выбросов позволяют значительно сократить количество выбросов и ввести контроль за производством и эксплуатацией транспортных средств, работающих на углеводородном топливе.

### **Выводы по разделу 2**

Условия, при которых образуются токсичные вещества в двигателе внутреннего сгорания различны. Образование угарного газа, углеводородов и углерода связано с химическими реакциями окисления топлива, протекающими как в процессе смесеобразования, так и при сгорании топлива во время рабочего цикла двигателя. Образование оксидов азота связано с термическим характером и не связано с реакциями окисления топлива.

Основной причиной образования токсичных веществ в двигателе внутреннего сгорания является несовершенство смесеобразования, что приводит к неполному сгоранию топлива, а также загрязнение топлива различными примесями. В идеальном случае при полном сгорании топлива должны образовываться пары воды и углекислый газ, которые не относятся к токсичным веществам. Но получить идеальный процесс сгорания топлива на

различных режимах работы двигателя или иметь идеально чистое топливо невозможно. Поэтому токсичные компоненты в отработавших газах всегда сопровождают работу двигателя внутреннего сгорания.

### **Выводы по разделу 3**

В качестве альтернативных видов топлива рассматриваются: сжиженный нефтяной газ, природный газ и биометан, электричество, биотопливо и водород.

Наиболее перспективным альтернативным топливом является сжатый природный газ ввиду экологичности, меньшим выбросом токсичных веществ в атмосферу при аналогичных показателях производительности.

Так как запасы метана практически неограниченны, он очень дешев. Возможно переоборудование для работы на метане практически любых бензиновых двигателей (карбюраторных, инжекторных) и даже дизельных (хотя объем доработок последних существенно выше и это не всегда экономически целесообразно). Кроме традиционной добычи газа, метан можно получать при переработке органических отходов (биогаз). Но при использовании метана в качестве моторного топлива возникает одна проблема - компактно его можно хранить только в сжатом виде под давлением в 250 атмосфер, для чего нужны очень прочные баллоны. Если делать их из стали, то придется возить с собой батарею баллонов весом до полутора тонн - такой балласт могут взять на борт только грузовики и автобусы, да и то ценой существенного уменьшения грузоподъемности.

### **Выводы по разделу 4**

Серийные автомобили на природном газе выпускаются в двух вариантах исполнения: двухтопливные и монотопливные. Для перехода на природный газ автопроизводители используют имеющиеся бензиновые двигатели (двигатели с искровым зажиганием). Серийные автомобили на природном газе предлагают большинство автопроизводителей, в том числе Lada, УАЗ, ГАЗ, КамАЗ, Audi, BMW, Citroen, Chevrolet, Fiat, Ford, Honda, Hyundai, Mercedes-Benz, Opel, Peugeot, Seat, Skoda, Toyota, Volkswagen, Volvo. Автомобили реализуются в регионах, где использование природного газа наиболее распространено.

Газобаллонное оборудование для работы на сжатом природном газе объединяет систему питания газом и электронную систему управления. Состав газобаллонного оборудования для серийных и модифицированных автомобилей в основном идентичен и может иметь конструктивные различия в зависимости от конкретного производителя газобаллонного оборудования.

### **Выводы по разделу 5**

В результате симуляции двигателя на бензине наблюдается снижение мощности на 2,8% расчетного двигателя относительно эталонного ВАЗ-21129 – 103 л.с. при 5800 об./мин. и 106 л.с. при 5800 об./мин. соответственно. При этом происходит увеличение крутящего момента на более низких оборотах коленчатого вала – 153 Н·м при 3500 об/мин у расчетного двигателя и 148 Н·м при 4200 об/мин у двигателя ВАЗ-21129.

При изменении в расчетной модели вида топлива с бензина на сжатый газ наблюдается снижение мощности двигателя на 10,7% - с 103 л.с. до 92 л.с. при 5800 об/мин коленчатого вала. Также снижается на 13% крутящий момент двигателя – с 153 Н·м до 133 Н·м при 3500 об/мин коленчатого вала.

При работе на бензиновом топливе исследования по содержанию вредных веществ показали следующие результаты:

- Количество оксидов азота  $\text{NO}_x$ :  
Среднее значение: 29,65 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 47,44 мг/км;  
Установленные нормы: 60 мг/км;
- Количество угарного газа  $\text{CO}$ :  
Среднее значение: 469,6 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 704,4 мг/км;  
Установленные нормы: 1000 мг/км.
- Количество углеводородов  $\text{HC}$ :  
Среднее значение: 24,46 мг/кг;  
С коэффициентом ухудшения: 31,8 мг/км;  
Установленные нормы: 100 мг/км.

При работе на сжатом природном газе исследования по содержанию вредных веществ показали следующие результаты:

- Количество оксидов азота  $\text{NO}_x$ :  
Среднее значение: 9,13 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 14,6 мг/км;  
Установленные нормы: 60 мг/км;  
Снижение выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  на 69%.
- Количество угарного газа  $\text{CO}$ :  
Среднее значение: 367,6 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 551,4 мг/км;  
Установленные нормы: 1000 мг/км;  
Снижение выбросов угарного газа  $\text{CO}$  на 21,7%.
- Количество углеводородов  $\text{HC}$ :  
Среднее значение: 32,6 мг/км;  
С коэффициентом ухудшения: 42,4 мг/км;  
Установленные нормы: 100 мг/км;  
Снижение выбросов углеводородов  $\text{HC}$  на 23,5%

Анализ количества основных компонентов токсичных веществ в отработавших газах расчетного двигателя при работе на бензине и на сжатом природном газе показал соответствие современным нормам токсичности.

## Список используемых источников

1. Камерлохер В. А., Осинцев А.И., Беляева А.А. К вопросу токсичности двигателей внутреннего сгорания // “Young Scientist” #12.1. – июнь 2015
2. Европейские экологические стандарты: от «Евро-0» до «Евро-6» [электронный ресурс]. URL: <https://koneks-oil.ru/blog/evropeiskie-ekologicheskie-standarty.html> (Дата обращения 02.06.2020)
3. European emission standards [электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_emission\\_standards](https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards) (Дата обращения 10.06.2020)
4. "Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information". Eur-lex.europa.eu. Retrieved 2011-02-02
5. Евро-5 [электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%B2%D1%80%D0%BE-5> (Дата обращения 09.06.2020)
6. "Commission Regulation (EU) 2016/646 of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6)". Eur-lex.europa.eu. Retrieved 2019-08-15
7. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н, Токсичность двигателей внутреннего сгорания: Учеб пособие. – М.: Изд-во РУДН, 1998. -214с
8. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и продуктам их сгорания. М.: Госэнергоиздат, 1962
9. H. Klingenberg. Automobile Exhaust Emission Testing: Measurement of Regulated and Unregulated Exhaust Gas Components, Exhaust Emission Tests // Environmental Science and Engineering Environmental Engineering // Springer Science & Business Media // 2012
10. M. Ilhan Ilhak, S. Tangoz, S. Orhan Akansu, N. Kahraman. Alternative Fuels for Internal Combustion Engines // Professor, Dept of Mechanical Engineering,

Alhabeeb College of Engineering and Technology, Chevella, Telangana – India // 2019

11. Метан. [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BD>

(Дата обращения 02.06.2020)

12. РД 03112194-1095-03 Руководство по организации эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе // Федеральное государственное унитарное предприятие "Государственный научно-исследовательский институт автомобильного транспорта" (НИИАТ), Департаментом автомобильного транспорта Министерства транспорта Российской Федерации // 2003

13. Рынок КППГ: мировой опыт развития и уроки для России // ООО «Эрнст энд Янг — оценка и консультационные услуги» // 2019

14. «SEAT Adds 173 CNG Models to its Car-sharing Fleet» [электронный ресурс]. URL: <https://www.ngvglobal.com/blog/seat-adds-173-cng-model-to-its-car-sharing-fleet-0322> (Дата обращения 11.06.2020)

15. «Škoda Shows Natural Gas Powered SCALA G-TEC in Berlin» [электронный ресурс] URL: <https://www.ngvglobal.com/blog/skoda-shows-natural-gas-powered-scala-g-tec-in-berlin-0628> (Дата обращения 11.06.2020)

16. Е. Багдасаров. Lada Granta и еще 7 битопливных автомобилей из России [электронный ресурс] URL: <https://www.autonews.ru/news/58259fc99a79474743120607#5>

17. Компоненты Vesta CNG [электронный ресурс] URL: <https://www.lada.ru/cars/vesta/cng/about.html> (Дата обращения 15.06.2020)

18. Компоненты Largus CNG [электронный ресурс] URL: <https://www.lada.ru/cars/largus/cng/about.html> (Дата обращения 15.06.2020)

19. LADA Vesta CNG Дополнение к руководству по эксплуатации автомобиля и его модификаций (состояние на 26.02.2020 г.) // АО «АВТОВАЗ» // 2020

20. Двигатель Лада Веста 1.6 л. (ВАЗ 21129). Характеристики двигателя Веста. [электронный ресурс] URL: <http://wikimotors.ru/dvigatel-lada-vesta/> (Дата обращения 15.06.2020)
21. Какой двигатель стоит на Лада Веста: технические характеристики и его ресурс. [Электронный ресурс] URL: <https://automanya.ru/lada-drugoe/21129-dvigatel.html> (Дата обращения 15.06.2020)
22. Правила ЕЭК ООН N 83 (пересмотр 5) «Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей» // 2015
23. Вибе И.И., Тепловой расчёт двигателей внутреннего сгорания / И.И. Вибе // Челябинск.: Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, 1972. - с.282
24. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей. / А.С. Орлин, Д.Н. Вырубов, В.И. Ивин и др. М.: Машиностроение, 1983, изд. 4.
25. Дмитриевский А.В., Шатров Е.В. Топливная экономичность бензиновых ДВС. М.: Машиностроение, 1985.
26. Жегалин О.И., Лукачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. -М.: Транспорт, 1985.
27. Smolenskaya N.M. and Korneev N.V. Modelling of the combustion velocity in UIT-85 on sustainable alternative gas fuel, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 66 (2017) 012016 doi:10.1088/1755-1315/66/1/012016.
28. Сеначин, П.К. Моделирование процесса горения гомогенной смеси в двигателе с искровым зажиганием / П.К. Сеначин, М.А. Ильина, Д.Д.
29. Lämmle, Ch. Numerical and Experimental Study of Flame Propagation and Knock in a Compressed Natural Gas Engine / Ch. Lämmle // Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation. 2005.
30. L. Winkler, N. Hegman, C. Raffay and A. Palotas, “Ion current measurements in natural gas flames,” European combustion meeting. 2007.

31. Smolenskii V.V., Smolenskaya N.M. Methods for Assessing the Thermodynamic Characteristics of the Combustion Process Using the Indicator Diagram in Spark-Ignition Engines // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. №582. Article number 012003
32. Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V., Korneev N.V. Increase in the thermodynamic efficiency of the working process of spark-ignited engines on natural gas with the addition of hydrogen // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. №121. Article number 052009
33. Захаров И.Л. Методы исследования и пути совершенствования процессов газообмена и сгорания в бензиновых двигателях. // Автореферат диссертации к.т.н., ВолгПИ, Волгоград, 1986
34. Технические характеристики Vesta седан 1,6л 16-кл. (106 л.с.), 5 МТ. [Электронный ресурс] URL: <https://www.lada.ru/cars/vesta/sedan/tth.html> (Дата обращения 22.06.2020)
35. Технические характеристики Vesta CNG 1,6л 16-кл. CNG, 5 МТ. [Электронный ресурс] URL: <https://www.lada.ru/cars/vesta/cng/tth.html> (Дата обращения 22.06.2020)
36. И. Кишкурно «Битопливная Лада Веста — тест-драйв ЗР». Журнал «За рулем» [Электронный ресурс] URL: <https://www.zr.ru/content/articles/907549-daj-gazu/> (Дата обращения 22.06.2020)
37. ГОСТ 8.207 76 "Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения", в кн. основополагающие стандарты в области метрологии. - М.: Изд-во Стандартов, 1986.
38. Завадский Ю.В. Решение задач автомобильного транспорта методом имитационного моделирования. М.: Транспорт, 1977

## Приложения

### Приложение А

#### Общие расчетные показатели двигателя при работе на бензине

Случай	СИ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Скорость двигателя	rpm	6000	5500	4999	4499	3999	3500	3000	2500	2000	1500	999	499
Стехиометрические соотношения	-	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02
Расчетное соотношение А/В	-	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,70	14,71
Массовый расход воздуха	kg/hr	290,4	283,2	266,1	240,6	212,3	197,5	162,3	125,4	92,8	69,4	44,4	20,9
Псевдообъемная эффективность	kg/hr/rpm	0,048	0,051	0,053	0,053	0,053	0,056	0,054	0,050	0,046	0,046	0,044	0,042
Машинно-зависимое среднее эффективное давление	bar	9,63	10,38	10,88	11,11	11,21	12,07	11,54	10,67	9,76	9,55	8,72	7,15
Brake Power	kW	76,9	76,0	72,4	66,6	59,7	56,2	46,1	35,5	26,0	19,1	11,6	4,6
Удельные выбросы СО	g/kW/hr	3,00	2,82	2,03	1,87	1,72	1,68	6,25	1,56	1,92	1,61	1,11	0,47
Удельный расход топлива	kg/kW/hr	0,26	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,26	0,30
Выбросы несгоревшего топлива	g/kW/hr	5,48	5,19	4,83	4,61	4,41	4,10	3,99	4,02	3,88	3,74	3,49	3,35
Выбросы NO <sub>2</sub>	g/kW/hr	23,64	25,03	24,12	23,88	23,32	25,60	25,78	26,53	27,25	30,07	32,40	34,61
Эффективность заряда	-	0,99	1,05	1,09	1,08	1,07	1,13	1,08	1,00	0,92	0,92	0,88	0,84
Обеспеченная эффективность	-	0,99	1,05	1,09	1,08	1,07	1,13	1,08	1,00	0,92	0,92	0,88	0,83
Общая эффективность	-	0,99	1,05	1,09	1,08	1,07	1,13	1,08	1,00	0,92	0,92	0,88	0,83
Комбинированное смещение	m <sup>3</sup>	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
КПД двигателя	%	33,6	34,0	34,5	35,0	35,6	36,1	35,9	35,9	35,5	34,8	33,1	28,8
Эффективное давление	bar	1,42	1,36	1,30	1,23	1,15	1,09	1,01	0,91	0,82	0,75	0,68	0,59
Потеря энергии трения	%	4,96	4,46	4,11	3,86	3,65	3,26	3,15	3,07	3,00	2,75	2,57	2,38
Момент трения	N*m	18,08	17,33	16,51	15,57	14,59	13,88	12,83	11,63	10,47	9,59	8,59	7,51
Массовый расход топлива	kg/hr	19,75	19,27	18,11	16,37	14,44	13,43	11,04	8,53	6,31	4,72	3,02	1,42
Выброс СО	g/s	0,26	0,24	0,16	0,14	0,11	0,11	0,08	0,06	0,06	0,03	0,01	0,00
Расход несгоревшего топлива	g/s	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00
Выброс NO <sub>2</sub> с потоком	g/s	0,017	0,017	0,49	0,016	0,013	0,013	0,011	0,008	0,007	0,005	0,003	0,001
Скорость теплопередачи	W	31801	31568	30456	28260	25711	24594	21808	18343	15188	13146	10545	7346

Продолжение приложения А

Случай	СИ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Потеря теплопередачи	%	13,87	14,12	14,49	14,88	15,34	15,78	17,02	18,53	20,74	23,99	30,09	44,46
Указанная мощность	hp	118,39	115,24	108,69	99,08	88,27	82,23	67,17	51,71	37,78	27,60	16,77	6,91
ISAC	kg/kW/hr	3,29	3,30	3,28	3,26	3,23	3,22	3,24	3,25	3,29	3,37	3,55	4,06
ISFC	kg/kW/hr	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24	0,28
Указанный крутящий момент	N*m	140,5	149,2	154,8	156,8	157,1	167,3	159,4	147,3	134,5	131,0	119,5	98,4
Лямбда	-	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Эталонное давление	bar	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Давление на выпуске	bar	1,155	1,152	1,140	1,123	1,108	1,102	1,079	1,056	1,035	1,023	1,012	1,004
Коэффициент эквивалентности	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Давление во впускной трубе	bar	0,96	0,96	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00
CO	ppm	3078	2925	2138	2006	1878	1856	1716	1607	2086	1713	1121	415
HC	ppm	2758	2645	2497	2422	2356	2216	2150	2162	2067	1955	1735	1448
NOx	ppm	3689	3955	3865	3890	3865	4291	4307	4424	4494	4867	4991	4633
Остаточная газовая фракция	%	3,705	3,536	4,078	4,505	4,711	3,625	4,467	4,080	4,782	4,350	4,917	6,050
Эффективность очистки	-	0,963	0,965	0,959	0,955	0,953	0,964	0,955	0,959	0,952	0,956	0,951	0,939
Коэффициент очистки	-	0,963	0,965	0,959	0,954	0,952	0,964	0,955	0,959	0,952	0,957	0,951	0,939
Температура окружающей среды	K	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
Температура выхлопных газов	K	1304	1301	1294	1282	1269	1262	1249	1234	1203	1172	1106	960
Температура на впуске	K	305,7	305,2	304,7	304,9	306,6	306,6	306,5	307,0	307,7	308,7	309,4	310,1
Крутящий момент	N*m	122,4	131,9	138,3	141,2	142,6	153,4	146,6	135,6	124,0	121,4	110,9	90,9
Коэффициент улавливания	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Коэффициент улавливания воздуха	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Объемный КПД улавливаемого воздуха	-	0,87	0,92	0,95	0,96	0,95	1,01	0,97	0,90	0,83	0,83	0,80	0,75
Общая объемная эффективность	-	0,87	0,92	0,95	0,96	0,95	1,01	0,97	0,90	0,83	0,83	0,80	0,75

## Приложение Б

### Общие расчетные показатели двигателя при работе на сжатом природном газе

Случай	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Engine speed	rpm	6000	5499	4999	4500	4000	3499	3000	2500	1999	1499	1000	500
Стехиометрические соотношения	-	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05
Расчетное соотношение A/F	-	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
Массовый расход воздуха	kg/hr	267,3	257,5	236,4	210,1	184,4	174,8	139,2	107,0	80,2	60,7	38,9	18,5
Псевдообъемная эффективность	kg/hr/rpm	0,045	0,047	0,047	0,047	0,046	0,050	0,046	0,043	0,040	0,040	0,039	0,037
Машинно-зависимое среднее эффективное давление	bar	8,65	9,21	9,43	9,48	9,51	10,45	9,64	8,85	8,22	8,11	7,42	6,05
Мощность двигателя	kW	69,1	67,4	62,7	56,8	50,6	48,7	38,5	29,4	21,9	16,2	9,9	4,0
Удельные выбросы CO	g/kW/hr	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	1,8
Удельный расход топлива	kg/kW/hr	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,27	0,31
Выбросы несгоревшего топлива	g/kW/hr	8,18	7,93	7,61	7,34	7,09	6,98	6,66	6,67	6,62	6,96	7,33	8,87
Выбросы NO <sub>2</sub>	g/kW/hr	8,53	8,58	8,21	7,77	7,51	8,32	8,10	8,85	9,59	10,40	11,00	11,94
Эффективность заряда	-	0,91	0,96	0,97	0,94	0,93	1,00	0,93	0,85	0,80	0,80	0,77	0,73
Обеспеченная эффективность	-	0,91	0,96	0,97	0,94	0,93	1,00	0,92	0,85	0,80	0,80	0,77	0,73
Общая эффективность	-	0,91	0,96	0,97	0,94	0,93	1,00	0,92	0,85	0,80	0,80	0,77	0,73
Комбинированное смещение	m <sup>3</sup>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
КПД двигателя	%	29,54	29,92	30,33	30,89	31,38	31,82	31,62	31,46	31,16	30,50	29,01	24,94
Эффективное давление	bar	1,42	1,36	1,28	1,20	1,13	1,07	0,98	0,89	0,80	0,74	0,66	0,58
Потеря энергии трения	%	4,84	4,41	4,13	3,93	3,72	3,27	3,22	3,16	3,04	2,76	2,58	2,39
Момент трения	N*m	18,03	17,24	16,32	15,31	14,31	13,64	12,49	11,29	10,20	9,34	8,37	7,37
Массовый расход топлива	kg/hr	18,19	17,52	16,08	14,29	12,54	11,89	9,47	7,28	5,46	4,13	2,65	1,26
Выброс CO	g/s	0,31	0,3	0,28	0,25	0,21	0,21	0,17	0,13	0,1	0,07	0,04	0,02
Расход несгоревшего топлива двигателя	g/s	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
Выброс NO <sub>2</sub> с потоком	g/s	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,012	0,001	0,001

Продолжение приложения Б

Случай	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Скорость теплопередачи	W	29869	29438	27756	25303	22889	22195	19137	15956	13322	11553	9255	6456
Потеря теплопередачи	%	12,7	13,1	13,4	13,8	14,2	14,5	15,7	17,0	19,0	21,8	27,2	40,0
Указанная мощность	hp	107,8	103,7	95,6	85,8	75,9	72,0	56,9	43,4	32,2	23,7	14,4	5,9
ISAC	kg/kW/hr	3,32	3,33	3,32	3,28	3,26	3,26	3,28	3,30	3,34	3,44	3,62	4,18
ISFC	kg/kW/hr	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,25	0,28
Указанный крутящий момент	N*m	128,0	134,3	136,1	135,8	135,2	146,4	135,1	123,7	114,7	112,4	102,6	84,3
Лямбда	-	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Эталонное давление	bar	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Давление на выпуске	bar	1,14	1,13	1,12	1,10	1,09	1,09	1,06	1,04	1,03	1,02	1,01	1,00
Коэффициент эквивалентности	-	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
Давление во впускной трубе	bar	0,96	0,96	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00
CO	ppm	15213	15348	15361	15333	15323	15572	15453	15288	14974	14482	13466	10624
HC	ppm	3202	3141	3058	3004	2947	2938	2789	2782	2733	2810	2817	2930
NOx	ppm	1219	1240	1205	1161	1140	1279	1237	1347	1444	1533	1543	1440
Остаточная газовая фракция	%	3,82	3,89	4,57	4,98	5,13	3,38	4,79	4,79	5,38	4,84	5,51	6,57
Эффективность очистки	-	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,97	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93
Коэффициент очистки	-	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,97	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93
Температура окружающей среды	K	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
Температура выхлопных газов	K	1229	1226	1216	1204	1192	1187	1173	1156	1129	1099	1040	904
Температура на впуске	K	306	306	305	306	307	307	306	307	308	309	309	309
Крутящий момент	N*m	109,9	117,0	119,8	120,5	120,9	132,8	122,6	112,5	104,5	103,1	94,2	76,9
Коэффициент улавливания	-	1,000	1,000	1,001	1,001	1,001	0,999	1,001	1,000	1,001	1,000	1,000	1,001
Коэффициент улавливания воздуха	-	1,000	1,000	1,001	1,001	1,001	0,999	1,001	1,000	1,001	1,000	1,000	1,001
Объемный КПД улавливаемого воздуха	-	0,799	0,839	0,848	0,837	0,827	0,894	0,832	0,767	0,720	0,725	0,697	0,662
Общая объемная эффективность	-	0,798	0,839	0,847	0,836	0,826	0,895	0,831	0,767	0,719	0,725	0,697	0,661

