

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 Снижение токсичности современных атмосферных автомобильных  
двигателей

Обучающийся

Н.С. Горшков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский

(ученая степень, ученое звание, Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Анализ научной литературы о методах уменьшения токсичности современных автомобильных двигателей .....	8
1.1 Проблемы снижения токсичности автомобильного транспорта .....	8
1.2 Методы уменьшения выбросов загрязняющих веществ в бензиновых и дизельных двигателях автомобилей .....	12
1.2.1 Система рециркуляции отработавших газов (EGR) ...	12
1.2.2 Мощность и эффективность мотора.....	13
1.2.3 Пропорция воздуха и топлива.....	14
1.2.4 Устройства для очистки отработанных газов.....	15
1.2.5 Дизельный сажевый фильтр.....	16
1.3 Строение и использование бензиновых двигателей и дизельных агрегатов .....	18
1.4 Сжигание ископаемого энергоносителя .....	19
1.5 Образование загрязняющих веществ .....	21
1.5.1 Выбросы NO <sub>x</sub> .....	22
1.5.2 Эмиссии углеводородов (НС) .....	23
1.5.3 Твердые частицы.....	24
1.5.4 Диаграммы эффективности мотора.....	25
1.5.5 Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на объем эмиссии.....	26
1.5.6 Бензиновые двигатели.....	26
1.5.7 Момент зажигания.....	27
1.5.8 Синхронизация клапанов.....	28
1.6 Законодательство о выбросах и испытаниях .....	30
1.6.1 Ездовой цикл.....	30
1.6.2 Городской цикл и внегородской цикл.....	32

1.6.3 Эмиссионные лимиты. Легковые автомобили и малотоннажный транспорт (до 2500 кг) .....	34
Глава 2 Методологии оценки эмиссий .....	36
2.1 Методики подсчета эмиссий и информационные массивы ...	36
2.1.1 Модель средней скорости.....	36
2.1.2 Модель мгновенных выбросов.....	37
2.2 Анализ и контраст методик оценки эмиссий автотранспорта	37
2.3 Анализ и сопоставление подходов к моделированию эмиссии автотранспорта .....	42
Глава 3 Обзор результатов экспериментальных исследований .....	45
3.1 Модель реализации LabVIEW.....	45
3.1.1 Функционал реального времени для анализа эмиссий	45
3.1.2 Модуль для процедуры холодного старта.....	49
3.1.3 Исследование и анализ моментальной скорости и ускорения транспортного средства с целью определения ездового профиля.....	50
3.1.4 Модуль анализа данных.....	50
3.2 Типы выбросов и подходы к моделированию.....	51
Глава 4 Обзор результатов экспериментальных исследований и моделирования токсичности в процессе ездового цикла .....	54
4.1 Анализ результатов замеров при проведении экспериментов	54
4.1.1 Тестирование в режиме ожидания.....	54
4.1.2 Короткий городской маршрут.....	59
4.1.3 DCU-испытание на автомагистрали.....	63
4.2 Сравнение результатов .....	66
4.2.1 Тестирование улично-дорожной сети и скоростных трасс.....	66
4.2.2 Определение коэффициентов выбросов.....	69
4.3 Подведение итогов исследования .....	74
4.3.1 Определение начального цикла вождения.....	74

4.3.2 Анализ потребления энергии во время движения.....	75
Заключение.....	78
Список используемых источников.....	80

## Введение

Актуальность работы и научная значимость настоящего исследования.

Проблема содержания вредных примесей в атмосфере получает все большее внимание в сфере транспорта, преимущественно из-за загрязнения, создаваемого автомобильными выхлопами в населенных пунктах. Актуальность оценивания реального объема загрязняющих веществ в воздухе распространяется как на территорию Европы, так и на мировые масштабы. Вред, наносимый экосистеме и здоровью людей выхлопами из транспортных средств, является значительным. Угарный газ (СО), например, представляет собой летальную угрозу в не вентилируемых помещениях, что подтверждено научными работами. Также выделяется канцерогенный эффект от воздействия веществ, содержащихся в автомобильных выхлопах, что повышает уровень тревоги среди населения в контексте увеличения глобальной транспортной активности. В то же время, вопросы эффективности использования энергоресурсов в транспортной сфере в ряде развивающихся стран остаются недостаточно освещенными по сравнению с прогрессом в промышленно развитых государствах. Учитывая стремительный рост численности и мобильности населения в странах, находящихся на пути развития, насущной задачей становится внедрение стратегий по снижению уровня углеродных выбросов и разработка устойчивых транспортных систем.

Таким образом, изучение методов минимизации вредных выбросов современных автомобильных двигателей в атмосферу представляет собой значимую проблематику для магистерского исследования.

Объект исследования.

Атмосферный двигатель внутреннего сгорания автомобиля

Предмет исследования.

Пути снижения токсичности

Целью работы

Является исследование путей снижения токсичности современных атмосферных автомобильных двигателей.

Гипотеза исследования

Состоит в том, что изучение и применение современных технологических решений для мониторингу стиля вождения по ездовому циклу может обеспечить чистое и эффективное сгорание в ДВС.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Выполнить анализ проблемных аспектов и разработать контент для исследования методов минимизации токсичности современных автомобильных двигателей, работающих на атмосферном воздухе;
2. определить способы уменьшения вредных выбросов в атмосферу от двигателей современных автомобилей.

Методы исследования.

Аналитический метод исследования, техника моделирования операций, подход к проведению экспериментальных анализов.

Научная новизна исследования

основывается на задаче уменьшения вредных выбросов двигателя путем использования передовых технологий.

Личное участие автора

Суть заключается в том, что создатель был активным участником в создании аналитического обзора в рамках исследуемой области, в разработке исследовательской модели, а также в анализе данных моделирования и формировании на их основе практических советов и заключений.

Апробация и внедрение результатов работы

велись в течении всего исследования. Его результаты докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» в 2022, 2023 и 2024 г.;

- международная научно-практическая конференция «Перспективы развития науки и образования», Россия, г. Тамбов, 31 мая 2023 г.;
- опубликована одна научная статья: Горшков Н.С. Выявление возможностей повышения эффективности бензинового ДВС за счет добавки водорода для активации процесса сгорания / Смоленская Н.М., Макаручук А.В., Андронов К.В., Горшков Н.С., Масленников С.В. // Научный альманах 2023 · N 5-2(103). С.48-52.

На защиту выносятся:

1. анализ перспектив применение современных технологических решений для снижения токсичности современных атмосферных автомобильных двигателей;
2. возможности снижение токсичности современных атмосферных автомобильных двигателей.

Структура магистерской диссертации.

Диссертации состоит из введения, 4 глав, заключения с основными результатами и выводами, содержит 51 рисунка, 11 таблиц, списка используемых источников (85 источник). Основной текст изложен на 88 страницах.

## **Глава 1 Анализ научной литературы о методах уменьшения токсичности современных автомобильных двигателей**

Атмосферное загрязнение в урбанизированных районах определяется как критическая экологическая угроза для здоровья глобального сообщества [1]. В контексте недавно принятых экологических норм и законов, появилась актуальная задача разработки эффективных методик для оценки объемов выбросов от автомобильного транспорта. Разработанные технологии для измерения эмиссии должны гарантировать точный мониторинг уровня выбрасываемых автотранспортом токсичных газов, выходящих из их выхлопных систем. Среди вредных веществ, выпускаемых в атмосферу, встречаются углеводороды (HC), оксиды азота (NO<sub>x</sub>), угарный газ (CO), двуокись углерода (CO<sub>2</sub>), частицы сажи (PM) и серный ангидрид (SO<sub>x</sub>). Экологический вред от таких выбросов проявляется в формировании атмосферного загрязнения, возникновении смога, кислотных осадков, повреждении легочной и печеночной ткани, риске развития онкологии и сердечно-сосудистых заболеваний, а также в ускорении процессов глобального изменения климата.

### **1.1 Проблемы снижения токсичности автомобильного транспорта**

Автопроизводители и автолюбители имеют возможность способствовать уменьшению загрязняющих выбросов, применяя три различные методики (рисунок 1):

- оптимизация работы двигателя через внедрение электронного управления зажиганием, инжекторных систем подачи топлива, и использование ЭБУ (электронных блоков управления) для регулирования объемов потребляемого двигателем топлива;
- улучшение производительности автомобиля через использование легких материалов, минимизацию аэродинамического

сопротивления, оптимизацию работы трансмиссии, и внедрение системы рекуперации энергии при торможении;

- унифицированные методы управления автомобилем, свободные от помех дорожные условия, поддержание максимально эффективной скорости транспортного средства и уменьшение числа пусков двигателя на холодную.

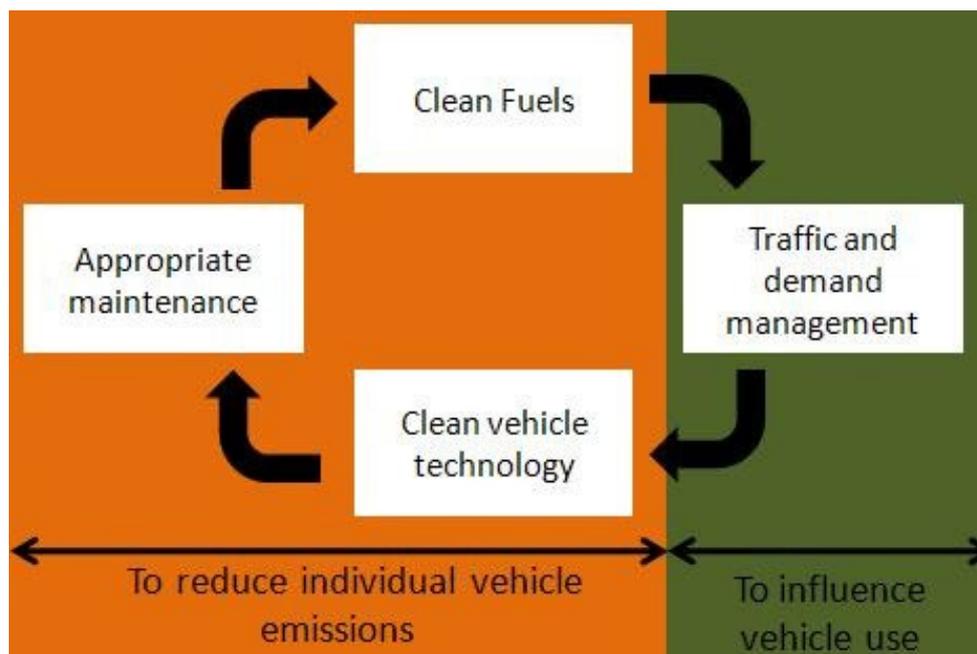


Рисунок 1 – Подходы к сокращению выбросов.

В качестве иллюстрации метода уменьшения выхлопов посредством моторной инновации сегодня применяется трехкомпонентная каталитическая система (рисунок 2), одновременно решающая три функции [2]:

- процесс редукции оксидов азота, приводящий к образованию молекулярного азота и кислорода (1):
- процесс трансформации монооксида углерода (угарного газа) в диоксид углерода (углекислый газ) (2):
- превращение несгоревших углеводородов в углекислый газ и воду происходит через процесс окисления (3).

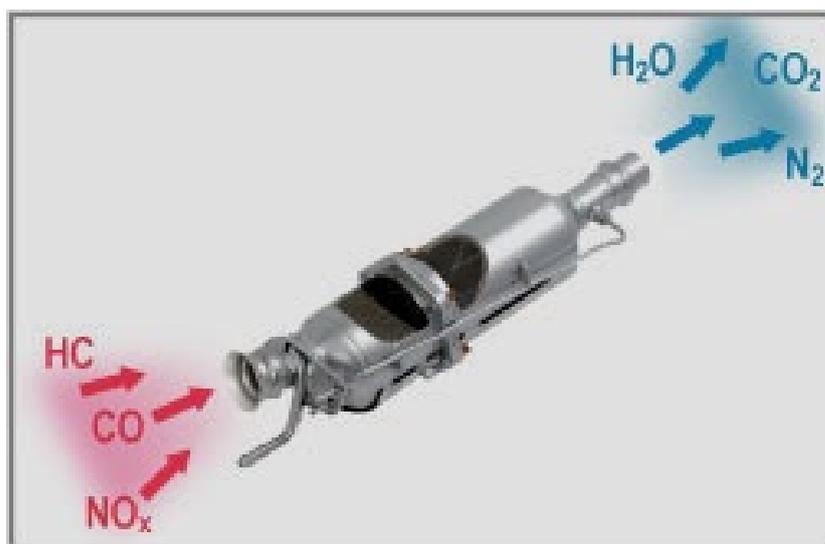


Рисунок 2 – Трехкомпонентные каталитические нейтрализаторы.

- восстановление оксидов азота путем преобразования в азот и кислород (1):



где  $\text{NO}_x$  – окислы азота  $\text{NO}$  или  $\text{NO}_2$ ;

$\text{O}_2$  – кислород;

$\text{N}_2$  – азот;

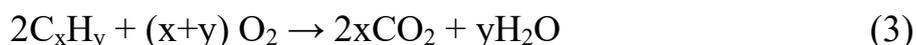
- окисление угарного газа до углекислого газа (2):



где  $\text{CO}$  – оксид углерода;

$\text{CO}_2$  – диоксид углерода;

- окисление несгоревших углеводородов ( $\text{HC}$ ) до углекислого газа и воды (3):



где  $\text{C}_x\text{H}_y$  – углеводороды, в которых;

$x$  – количество атомов углерода в молекуле углеводорода,

$y$  – количество атомов водорода в молекуле углеводорода,

$\text{H}_2\text{O}$  – вода.

Катализаторы служат для уменьшения эмиссии вредных компонентов из выхлопных газов автомобилей, при этом периодически внедряются обновлённые нормы экологической безопасности, целью которых является ужесточение требований к уровню выбросов от новой автотехники [3].

Данные расчеты позволяют оценить теоретические уровни эмиссии для каждого типа вредных веществ, которые, несмотря на свою высокую точность, все же не учитывают индивидуальное влияние стиля вождения отдельных водителей на реальные выбросы. Детальный анализ этих аспектов будет представлен в последующем литературном обзоре (рисунок 3) [4].

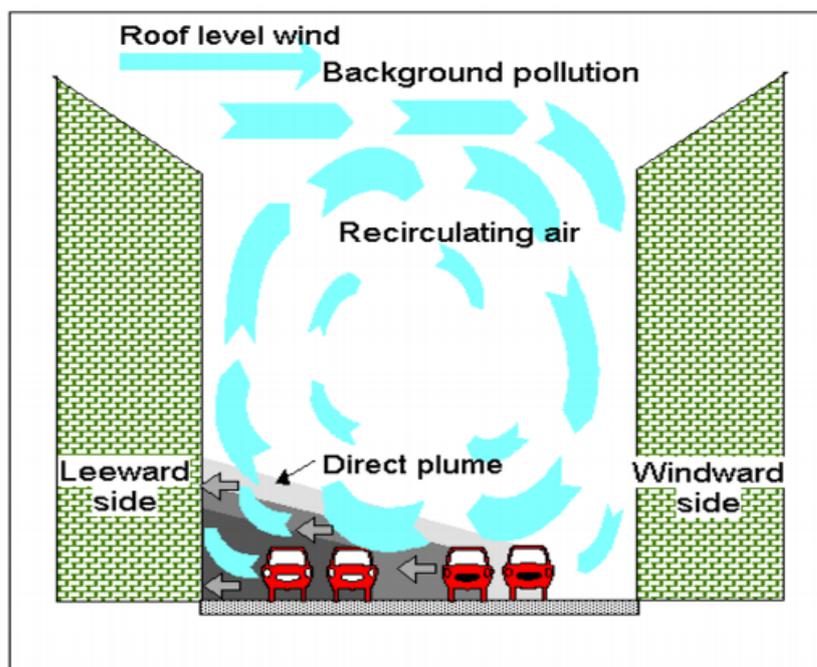


Рисунок 3 – Методика оперативного устранения загрязнения улиц.

Применение устройства для анализа данных системы бортовой диагностики автомобилей (OBD), называемого сканером Elm 5, способствует измерению уровней эмиссии загрязняющих веществ. Это устройство также способно фиксировать характеристики движения авто. Данный водительский цикл предоставляет информацию о среднем режиме движения по дорогам, включая стиль управления транспортным средством [5].

Газоанализатор Autologic — это компактный прибор для анализа газов, совместимый с карманными ПК и устройствами на базе ОС Windows, включая

персональные компьютеры и ноутбуки, как указано на рисунке 4. Этот анализатор разработан для применения в условиях реальной эксплуатации транспортных средств, где особенно ценятся его надежность и высокая точность измерений. Путем подключения зонда к выхлопной системе автомобиля, газоанализатор осуществляет отбор проб выбросов, которые затем анализируются. Передача собранных данных осуществляется через Bluetooth на карманный ПК. Специализированное ПО Autologic обрабатывает результаты и визуализирует информацию о составе выбросов на дисплее. Газоанализатор способен определять концентрацию пяти видов газов: углеводороды (HC), оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), оксиды азота (NO<sub>x</sub>) и кислород (O<sub>2</sub>).



Рисунок 4 – Автологический газоанализатор. [5]

## **1.2 Методы уменьшения выбросов загрязняющих веществ в бензиновых и дизельных двигателях автомобилей**

### **1.2.1 Система рециркуляции отработавших газов (EGR)**

В процессе работы двигателя внутреннего сгорания выхлопные газы смешиваются с оставшимся от предыдущих этапов рабочего цикла отработанным газом, формируя в камере сгорания совокупность продуктов горения. Эта смесь выступает в роли дилуента, уменьшающего концентрацию кислорода и тем самым влияет на процесс горения в цилиндре [6]. Это, в свою очередь, способствует уменьшению образования окислов азота (NO<sub>x</sub>), что

является положительным аспектом использования системы рециркуляции отработавших газов (EGR). Однако, применение данной системы сопряжено с увеличением выбрасываемых углеводородов в атмосферу, что обусловлено замедлением реакции сгорания и усилением различий в процессах горения от цикла к циклу из-за понижения степени обогащения смеси.

### 1.2.2 Мощность и эффективность мотора

Часто используемым методом демонстрации производительности двигателя внутреннего сгорания на различных уровнях его работы служит составление кривой расхода топлива, которое отображается на двухосной сетке, где горизонтальная ось представляет обороты двигателя, а вертикальная – его загрузку. В число ключевых элементов, определяющих загрузку, входят такие факторы, как аэродинамическое сопротивление, сцепление шин с поверхностью дороги, интенсивность ускорения транспортного средства, угол подъема или спуска дороги, внутреннее трение механических компонентов двигателя и потребление энергии вспомогательными системами, например, системой кондиционирования воздуха [14].

В ходе научного анализа, направленного на выявление взаимосвязи между углом наклона проезжей части и уровнем загрязнения, было выявлено существенное повышение выбросов при уклоне 3,8%. Предшествующие исследования указывали на рост содержания NOx и CO с увеличением удельной мощности, демонстрируя напрямую пропорциональную связь этих параметров (4) [7].

$$P_s = \frac{F_e \cdot v}{Mv}. \quad (4)$$

где  $P_s$  – удельная мощность;

$F_e$  – сопротивление движению автомобиля;

$v$  – скорость вращения;

$M$  – крутящий момент двигателя.

Исследование также охватывало анализ того, как стиль вождения влияет на уровень выделения вредных веществ. Поведение за рулем

классифицировалось на три типа: спокойное, умеренное и агрессивное, каждому из которых присущи уникальные модели акселерации и замедления. Один и тот же водитель проводил эксперименты во всех режимах. В результате, агрессивный стиль вождения привел к четырехкратному росту эмиссии вредных веществ по сравнению с умеренным [8].

### **1.2.3 Пропорция воздуха и топлива**

Баланс между воздухом и топливом критически влияет на производственные показатели мотора. В процессе тестирования двигателя непосредственно проводятся измерения потребления топлива и воздушного потока [9].

Эффективность сгорания топлива в двигателе регулируется системой подачи топлива, компоновка которой подразумевает точное соизмерение с объемом поступающего в двигатель воздуха, обеспечивая оптимальные условия его работы. Рабочие параметры двигателя зависят от пропорции между воздухом и топливом, выраженной через относительное значение или коэффициент избытка воздуха  $\phi$ . В контексте искровых двигателей, термин «бедная» смесь указывает на преобладание воздуха над топливом, в то время как «богатая» смесь подразумевает избыток топлива по сравнению с воздухом, что критически влияет на процесс горения (рисунок 5) [10].

Ключевые параметры, влияющие на генерацию загрязняющих веществ, включают уровень содержания кислорода и максимальные температуры сгорания в цилиндрах двигателя. Поэтому пропорция воздуха к топливу играет важную роль в регулировании этих факторов. Как показано на графике в исследовании, недостаточно обогащенная топливная смесь способствует повышению уровня эмиссии углеводородных соединений, вызванного недостатком кислорода для полного окисления несгоревших частиц [5].

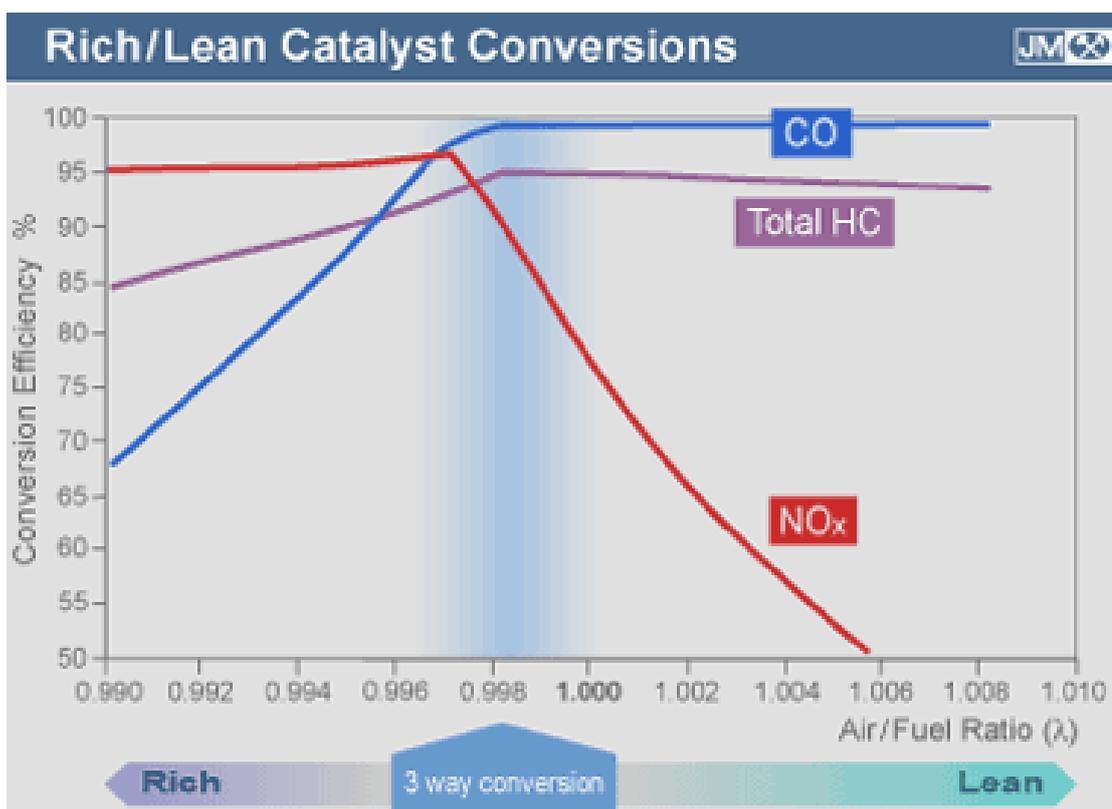


Рисунок 5 – Влияние состава смеси  $\lambda$  (отношение воздуха к топливу  $1/\alpha$ ) на выбросы двигателя с искровым зажиганием [19]

В случае применения обедненных смесей, процесс не полного сгорания приводит к экспоненциальному возрастанию уровня выбросов углеводородов, обусловленному либо неполными циклами сгорания, либо отсутствием искры зажигания [11].

#### 1.2.4 Устройства для очистки отработанных газов

В автомобиле между выпускным коллектором и глушителем размещается ключевая экологическая система, известная как трехкомпонентный каталитический нейтрализатор.

Каталитический конвертер (рисунок 6) представляет собой устройство, содержащее камеру каталитической реакции для превращения вредных выхлопных газов в их менее опасные аналоги. Стандартный трехкомпонентный каталитический нейтрализатор способен преобразовывать свыше 95% угарного газа (CO), оксидов азота (NOx) и углеводородов (HC) в диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), азот (N<sub>2</sub>) и водяные пары (H<sub>2</sub>O) соответственно [12].

Каталитический конвертер, выполненный из корпуса из нержавеющей стали, содержит внутри керамическую сотовидную структуру. Нанесённый на эту структуру алюминиевый оксид служит основой для драгоценных металлов - платины и родия. Платина эффективно способствует химическому окислению угарного газа и углеводородов, в то время как родий активно участвует в процессе редукции оксидов азота [13].

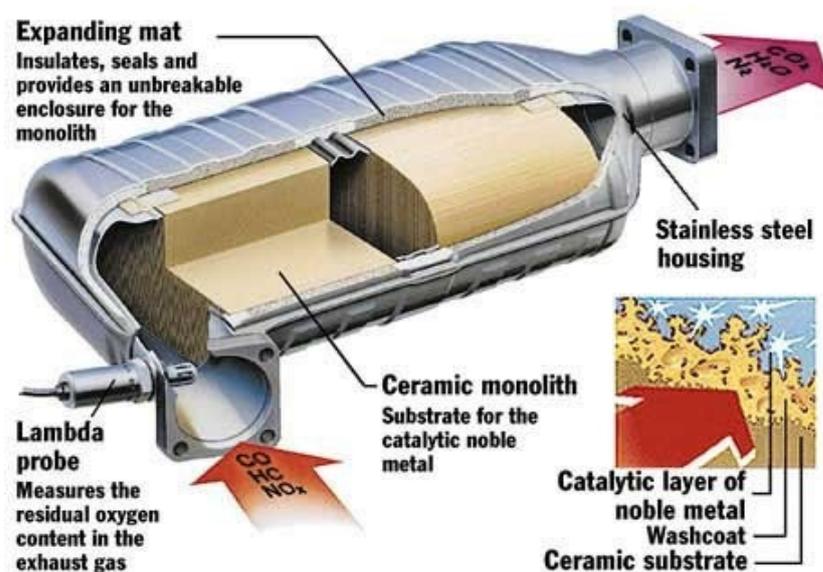


Рисунок 6 – Схема трехкомпонентного каталитического нейтрализатора [20]

Каталитический конвертер начинает функционировать при примерно 300°C. В интервале 800°C до 1000°C катализатор испытывает разрушение своих активных компонентов, таких как платина и родий. Повышение температуры до значений свыше 1000°C ускоряет деградацию катализатора. Использование этилированного топлива или же избыточно попадающее масло способствуют его отравлению [14].

### 1.2.5 Дизельный сажевый фильтр

Дизельный сажевый фильтр (DPF), представленный на рисунке 7, считается ключевым компонентом системы очистки выхлопных газов автомобиля, целью которого является эффективное удаление загрязнителей из газов, вырабатываемых двигателем, перед их выбросом в окружающую среду. В ответ на более строгие нормы Евросоюза ограничения выхлопных газов,

разработка и внедрение инновационных методов фильтрации, способных удерживать частицы сажи и снижать концентрацию токсичных компонентов в выхлопах до их выведения из системы выхлопа, становится приоритетной задачей. DPF обеспечивает сокращение вредных выбросов за счет использования современных фильтрующих технологий. [21].

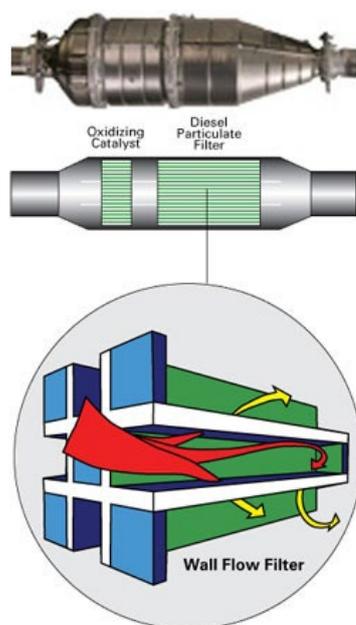


Рисунок 7 – Дизельный сажевый фильтр [22]

При достижении порога активируется механизм регенерации DPF, который значительно повышает температуру внутри фильтра (до 300–350 °С), инициируя процесс сгорания сажи [15].

В определенных ситуациях, когда достижение необходимой температуры невозможно, например, из-за множества коротких поездок или остановок двигателя, процесс регенерации дизельного сажевого фильтра (DPF) может не инициироваться. Активация индикатора DPF сигнализирует о необходимости вмешательства для начала регенерации, что требует движения на таких оборотах двигателя, которые будут способствовать увеличению температуры выхлопных газов до оптимального уровня. В случае, когда данные действия не предпринимаются и световой индикатор продолжает

гореть, это указывает на накопление сажи, угрожающее эффективности работы DPF [16].

Когда несколько индикаторов освещения активируются одновременно, целесообразно незамедлительно обратиться в сервисный центр для осуществления регенерации. Пренебрежение данным советом может привести к уменьшению выходной мощности двигателя и, как следствие, к блокировке фильтра твердых частиц (DPF). В случае, если блокировка DPF достигает уровня, при котором регенерация становится невозможной, потребуется его замена [17].

### **1.3 Строение и использование бензиновых двигателей и дизельных агрегатов**

В дизельном двигателе воздух сжимается в камере, после чего вводится топливо, самовоспламеняющееся от высокого давления, что приводит к работе двигателя. Таким образом, сгорание в дизельных двигателях происходит при стабильном давлении, в то время как в бензиновых двигателях оно происходит при стабильном объеме [18].

Двигатели внутреннего сгорания с искровым зажиганием (SI) и дизельные двигатели (CI) относятся к категории поршневых двигателей. В таких двигателях поршни выполняют возвратно-поступательные движения внутри цилиндров, трансформируя тем самым химическую энергию топлива в механическую работу. Эта работа передается на коленчатый вал через систему шатунов и кривошипов, обеспечивая его постоянное вращение и приводя в движение транспортное средство. Для осуществления этого процесса применяются различные рабочие циклы, включая двухтактные и четырехтактные. Двухтактный цикл позволяет завершить процесс сгорания и выпуска за один полный оборот коленвала, тогда как четырехтактный – за два оборота. В современных легковых автомобилях чаще используют

четырёхтактные двигатели, что было также подтверждено в рамках данного анализа [20].

#### 1.4 Сжигание ископаемого энергоносителя

Топливо может быть охарактеризовано как любой ресурс, способный к окислительному разложению с целью высвобождения энергии за счёт химических процессов. Основная химическая реакция, происходящая в процессе использования топлива, известна как окислительное горение. Для того чтобы процесс горения мог протекать полностью, необходимо наличие определённого количества кислорода, получаемого из атмосферного воздуха. Этот объём кислорода, идеально соответствующий необходимой пропорции для полного сгорания топлива, определяется как стехиометрический или теоретически необходимый воздух. Процесс, при котором всё топливо реагирует с доступным кислородом для полного сгорания, называется стехиометрическим горением, что демонстрируется на рисунке 8 [23].

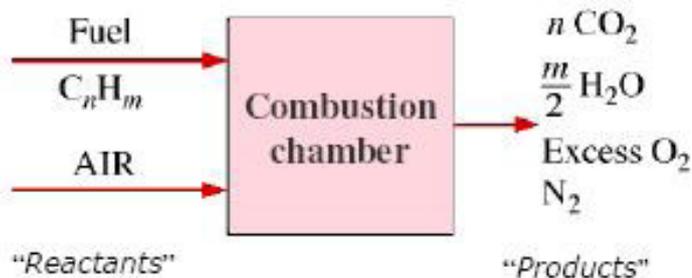
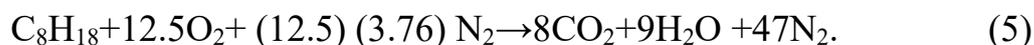


Рисунок 8 – Идеальное сгорание углеводородного топлива в камере сгорания

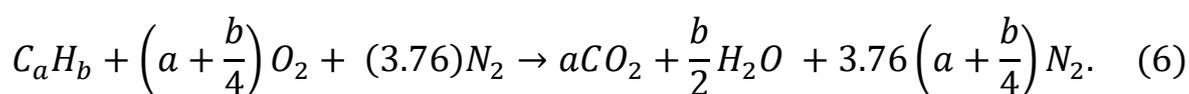
В ходе горения исходные вещества до начала химического процесса определяются как реагенты, а вещества, образовавшиеся в результате химической реакции, именуется продуктами реакции. Закон сохранения массы лежит в основе балансировки химических уравнений, утверждая, что суммарная масса каждого из элементов остается неизменной в процессе химической трансформации. Ниже приведен пример химического уравнения,

демонстрирующего полное окисление октана ( $C_8H_{18}$ ), который активно применяется в качестве углеводородного топлива, в условиях кислорода атмосферы (5) [24]:



где  $C_8H_{18}$  – октан.

Данное уравнение возможно дополнить для выведения универсальной формулы, как демонстрируется далее (6):



где  $a$  – количество атомов углерода;

$b$  – количество атомов водорода.

Из анализа представленных уравнений мы можем заключить, что углекислый газ ( $CO_2$ ), вода ( $H_2O$ ), и азот ( $N_2$ ) являются основными продуктами теоретически совершенного стехиометрического горения углеводородсодержащего топлива в атмосфере кислорода и азота. Тем не менее, в реальных условиях процесс сгорания сопровождается образованием дополнительных продуктов из-за таких факторов, как разложение молекул под воздействием температуры (диссоциация), примесь добавок в топливо, а также модификация пропорции воздуха к топливу для повышения эффективности мотора. В случае применения концепции октанового числа оптимальное соотношение масс воздуха к массе топлива выражается через уравнение (7) [25]:

$$\frac{A}{F} = \frac{59.5 \cdot 28.96}{1 \cdot 114} = 15.1 \quad (7)$$

где  $A$  – масса воздуха;

$F$  – масса топлива

## 1.5 Образование загрязняющих веществ

Проблематика загрязнения атмосферы в урбанистических зонах остается насущной и важной. В течение минувших пяти десятилетий, эмиссии от автомобильных двигателей внутреннего сгорания привлекли особое внимание в контексте их негативного воздействия на качество воздуха в городских агломерациях [26].

Эмиссии классифицируют на три основные категории:

- выбросы автомобиля возникают из топливной аппаратуры авто, включая карбюратор, аккумулирующую ёмкость и транспортирующие трубопроводы. Эти эмиссии обусловлены летучестью бензина и дневными колебаниями температур [27];
- эмиссии двигателя. Эмиссии двигателя охватывают выбросы до происходящих химических превращений внутри выхлопной системы [28];
- эмиссии, происходящие из выхлопных систем автомобилей, представляют собой концентрации загрязняющих веществ, формирующихся после процессов каталитического преобразования в катализаторе. Эти концентрации, часто называемые лимитами выбросов, подлежат строгому регулированию. Образование оксида углерода (CO) напрямую связано с балансом между количеством потребляемого воздуха и топлива, имея более выраженное значение, в отличие от других менее значимых переменных. Формирование CO в выхлопе обусловлено прерыванием химической реакции (8), что типично происходит при температуре около 1700 Кельвинов [29].



На рисунке 9 изображено, как соотношение воздуха к топливу влияет на эмиссию угарного газа. Демонстрируется, что при избыточном топливе

концентрация CO в десять раз превышает уровни, обнаруженные при стехиометрическом смешении.

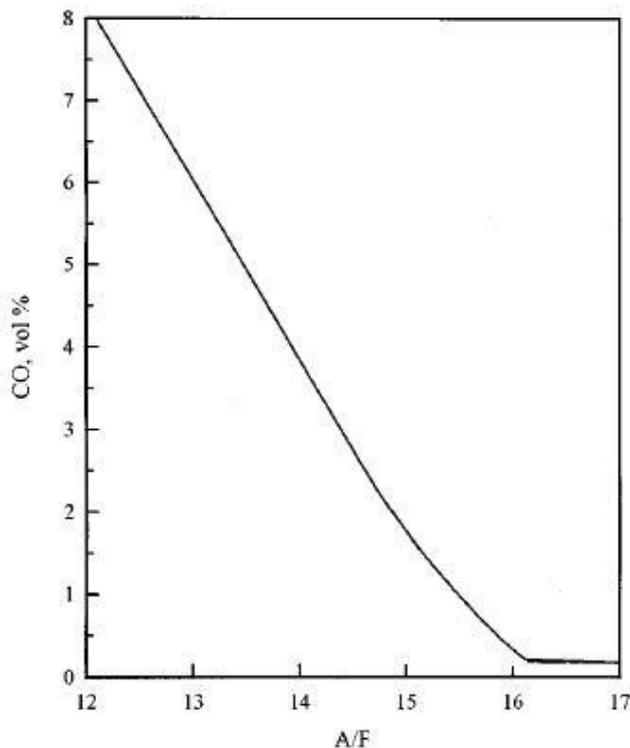


Рисунок 9 – Диаграмма выбросов CO от двигателя SI в зависимости от соотношения воздух/топливо [30]

### 1.5.1 Выбросы NO<sub>x</sub>

Процесс превращения кислорода в NO катализируется через реакцию Зельдовича (9, 10, 11).



Уровень эмиссии оксидов азота (NO<sub>x</sub>) тесно связан с температурными условиями процесса сгорания и наличием кислорода. Отмечается экспоненциальный рост концентрации NO при увеличении температуры, особенно это заметно при использовании смесей с низким содержанием топлива относительно кислорода (коэффициент избытка воздуха  $\phi=0,9$ ), что подтверждает исследование. Кроме того, из уравнения Аррениуса следует, что

скорость формирования NO прямо зависит от температурных параметров и концентрации кислорода в системе [31].

### 1.5.2 Эмиссии углеводородов (HC)

Углеводороды означают как те части топлива, что остались несгоревшими и не претерпели изменений в ходе горения, так и соединения, возникающие через разнообразные углеводородные процессы [32]. В исследованиях точно выделены четыре ключевых пути, через которые происходит эмиссия углеводородов (HC) [33]. На графическом изображении, представленном на рисунке 10, демонстрируется процесс формирования HC с помощью линий различной длины.

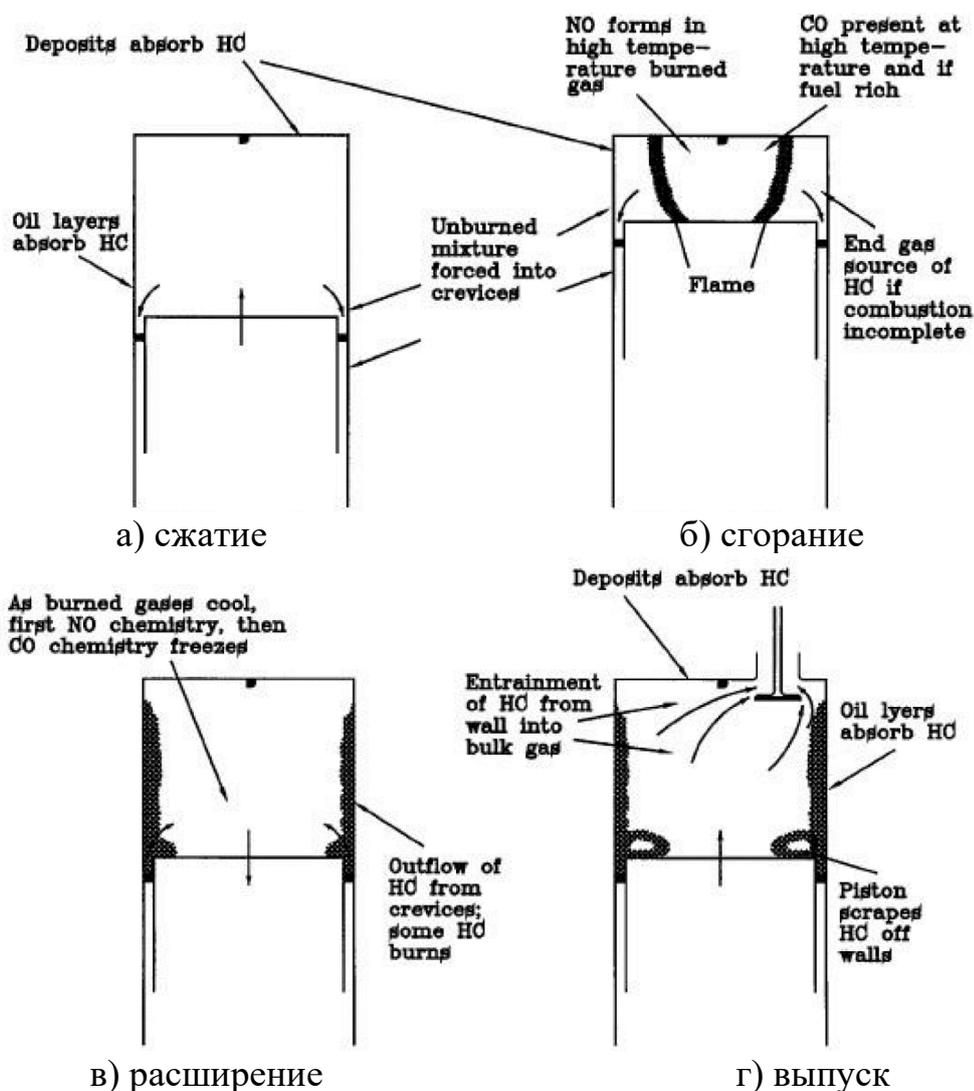


Рисунок 10 – Формирование углеводородных механизмов в двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием [33].

### 1.5.2.1 Гашение пламени

Тушение пламени длительное время признавалось ключевым источником эмиссий углеводородов. Эта явление реализуется на поверхностях камеры сгорания, где охлаждающие стенки функционируют как теплообменник, понижая тем самым цилиндровую температуру и воздействуя на процесс окисления топлива [34].

### 1.5.2.2 Поглощение паров топлива масляными пленками внутри цилиндра при процессах сжатия и впуска

Анализы демонстрируют, что введение смазочных масел в топливную смесь может вызвать рост эмиссии углеводородов вдвое или втрое по сравнению с работой на чистом топливе. Предполагается, что данное явление обусловлено абсорбцией топливных паров многослойными структурами моторного масла [35].

### 1.5.3 Твердые частицы

Формирование канцерогенных и мутагенных элементов сажи происходит через термический разрыв длинных углеводородных цепей в условиях кислородного дефицита. Выбросы твердых частиц представляют собой сочетание твердой фракции и аэрозоля. На рисунке 11 демонстрируется комплексный анализ составляющих выхлопных газов, испускаемых дизельными агрегатами [36].

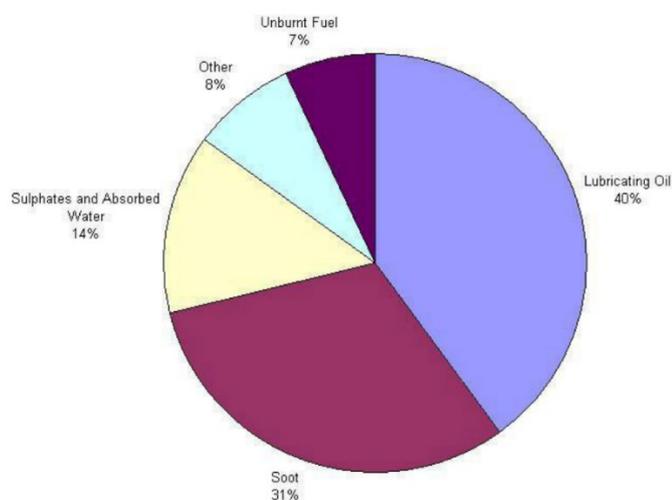


Рисунок 11 – Состав твердых частиц дизельного двигателя.

### 1.5.4 Диаграммы эффективности мотора

На рисунке 12 представлена характеристическая карта выбросов оксидов азота (NO<sub>x</sub>). Заметьте, что в данной ситуации для измерения оксидов азота (NO<sub>x</sub>) используется килограммы в час. С помощью данных карт возможно изучить паттерны потребления топлива и выбросов в разнообразных режимах работы [37].

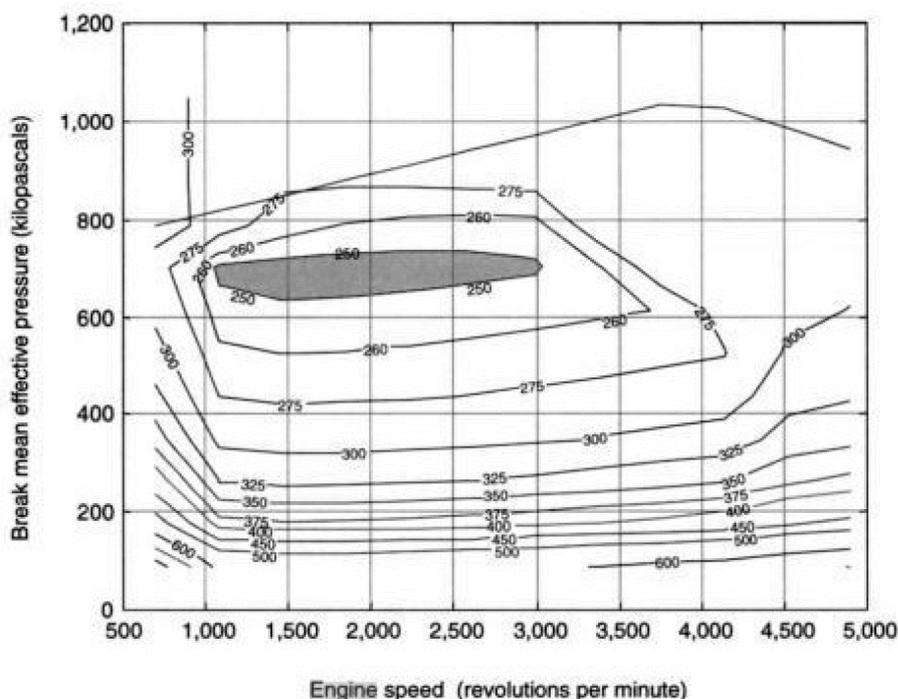


Рисунок 12 – Типичная карта характеристик двигателя с искровым зажиганием [38]

Тщательное создание карты характеристик двигателя представляет собой процесс, который может потребовать значительных финансовых и временных затрат. В данном контексте применяются испытания на динамометрическом стенде. Характерной методикой является изменение одного из параметров двигателя при фиксации другого. Часто для этих целей фиксируют крутящий момент и пошагово увеличивают обороты двигателя от минимальных до максимальных значений. Процесс позволяет собрать серию данных для каждого заданного уровня крутящего момента. Однако, чтобы детально характеризовать работу двигателя, требуется выполнить большое количество таких испытательных циклов [39].

Оптимизация рабочего объема, ассоциированного с маппингом двигателя, достижима через использование динамометрического испытательного стенда [40], но это может влечь за собой существенные энергетические потери в трансмиссии в процессе тестирования.

### **1.5.5 Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на объем эмиссии**

Эффективность двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием ограничена различными факторами, начиная от трения и заканчивая потерями на охлаждение. Эффективность таких двигателей измеряется через отношение величины сжатия топливно-воздушной смеси в цилиндрах до её воспламенения, что определяется как степень сжатия. При анализе бензиновых и дизельных двигателей выделяются ключевые аспекты их производительности. Для начала, производительность адаптируется посредством регулирования соотношения воздух/топливо при различной нагрузке, что сопряжено со значительными потерями эффективности. Далее, способность бензинового двигателя справляться со степенью сжатия ограничивается тенденцией топлива к детонации. Чтобы минимизировать вредные выбросы, соотношение воздуха к топливу (A/F) поддерживается близким к идеальному стехиометрическому значению. Тем не менее, повышение этого соотношения может способствовать увеличению эффективности [41].

### **1.5.6 Бензиновые двигатели**

После детального изучения бензиновых двигателей был составлен перечень с развернутым описанием ключевых аспектов, влияющих на эмиссию [42]:

- искра и момент зажигания;
- обороты мотора и возложенная мощность;
- соотношение воздух/топливо;
- фаза газораспределения;
- система рециркуляции отработавших газов (EGR);

- охлаждающая жидкость, или антифриз, играет ключевую роль в поддержании оптимальной работы двигателя автомобиля, предотвращая его перегрев.

### **1.5.7 Момент зажигания**

Момент формирования искры в камере сгорания критичен для тайминга запуска процесса сгорания. Преждевременное воспламенение приводит к избыточному передаточному эффекту работы от газов к поршню. Задержанное начало сгорания уменьшает максимальное давление в цилиндре, ослабляя эффективность преобразования энергии расширяющихся газов [43].

Оптимальный угол опережения зажигания для достижения максимального крутящего момента (МВТ) характеризуется как точка зажигания, при которой двигатель производит наибольший крутящий момент при стабильной скорости. Эта настройка также увеличивает тормозную мощность и эффективно снижает расход топлива во время торможения. Явно, МВТ зависит от оборотов двигателя. С увеличением скорости необходимо более раннее зажигание для сохранения идеальных условий сгорания. Кроме того, опережение зажигания изменяется в зависимости от нагрузки на двигатель и давления во впускном тракте, повышаясь при уменьшении нагрузки и падении давления, что помогает поддерживать высокие показатели мощности [44].

В исследовании тщательно изучено воздействие задержки воспламенения на 80 градусов по отношению к верхней мертвой точке (ВМТ), а также эффект предварительного угла зажигания на 30 градусов. Установлено, что время срабатывания зажигания напрямую влияет на уровень давления внутри цилиндра, что, в свою очередь, определяет максимальные температуры как сгоревших, так и оставшихся несгоревшими газов. Задержка зажигания приводит к повышению температуры отработавших газов, уменьшению эффективности работы двигателя и сокращению тепловых потерь. Эти изменения могут быть применены как способ управления уровнем эмиссии оксидов азота (NOx). Повышение уровня окисления как внутри

цилиндра, так и в выпускном коллекторе является прямым следствием замедления процесса зажигания [45].

Выявлено [46], что отклонение момента зажигания к более позднему времени приводит к уменьшению эмиссии загрязняющих веществ спустя три секунды после включения двигателя. Процесс ускорения момента искрообразования вызвал внезапное повышение уровня эмиссий, за которым последовало их стабилизирование. Кроме того, наблюдается снижение выделения углеводородов в процессе задержки зажигания, что не зависит от азротопливного соотношения. Связано это с интенсификацией окислительных процессов из-за повышения температур.

### **1.5.8 Синхронизация клапанов**

Настройка идеальных параметров для действий клапанов в разных условиях работы двигателя представляет собой задачу высокой сложности. Этот процесс включает в себя достижение разнообразных, зачастую конфликтующих целей, включая максимизацию крутящего момента и минимизацию удельного расхода топлива на единицу мощности при торможении (BSFC), а также обеспечение стабильного холостого хода и эффективного контроля над уровнем выбросов. В двигателях, оснащенных механизмом изменения фаз газораспределения, фазировка распределительного вала адаптируется к изменениям оборотов двигателя и к нагрузке, вызванной положением дроссельной заслонки [47].

При снижении частоты вращения двигателя происходит задержка момента открытия впускного клапана. Это способствует повышению качества работы двигателя на холостых оборотах, делая его более ровным. В системах с двумя впускными клапанами возможно деактивировать один из них, что улучшает стабильность процесса сгорания и ускоряет его. На умеренных оборотах открытие впускного клапана происходит заметно раньше, что способствует повышению крутящего момента. Также раннее открытие клапана способствует рециркуляции выхлопных газов за счет продления

периода их перекрытия, что в свою очередь помогает уменьшить потребление топлива и снизить эмиссию оксидов азота [48].

Рисунки 13 и 14 демонстрируют, как разные этапы цикла газораспределения влияют на эмиссии BSFC и NO при установленной скорости.

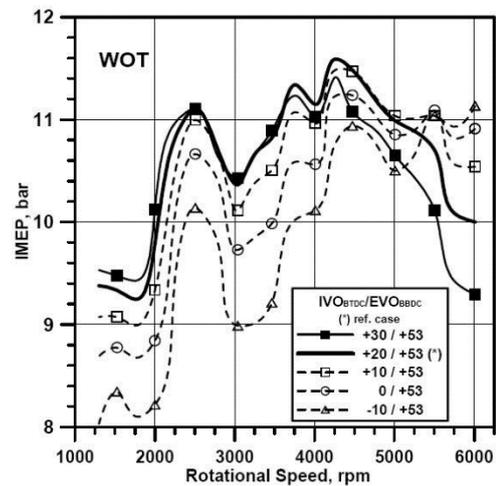
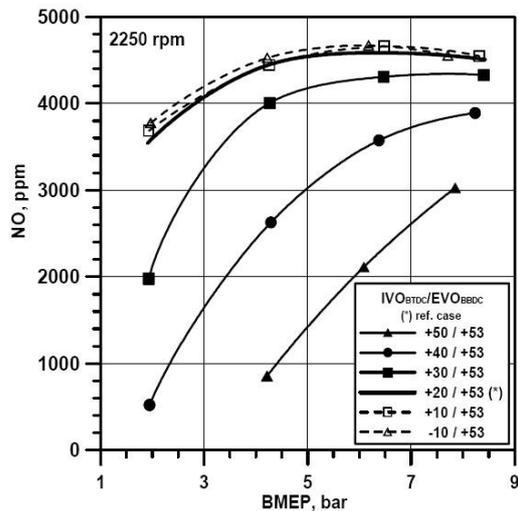


Рисунок 13 – Частичная нагрузка NO Выбросы при постоянной скорости [49]      Рисунок 14 – Влияние фазировки впускного кулачка на среднее эффективное давление на впуске (IMEP) [50]

На основе данных, представленных на рисунке 13, очевидно, что корректировка времени открытия впускных клапанов (IVO) оказывает существенное влияние на уровень выбросов оксидов азота (NO). Анализируя и сопоставляя ускоренное открытие IVO на 10° и его замедление на 50° на основании данных, изложенных на рисунке 14, становится очевидным, что выбросы NO значительно возрастают, увеличиваясь примерно в 5 раз при ускорении открытия IVO. Это повышение связано с задержкой в открытии IVO, что ведет к наложению периодов открытия впускного и выпускного клапанов, активируя тем самым процесс рециркуляции выхлопных газов (EGR). Рециркуляция выхлопных газов эффективно снижает пиковые температуры в цилиндрах, что, в свою очередь, ведет к уменьшению образования оксидов азота. Было также выявлено, что при оптимизации времени открытия впускного клапана и работе двигателя при средних

нагрузках достигается снижение выбросов углеводородов благодаря более эффективному сжиганию оставшихся в цилиндре выхлопных газов [51].

## **1.6 Законодательство о выбросах и испытаниях**

20 марта 1970 года стало знаковой датой для экологической политики Европы, когда впервые были введены нормы, регулирующие выбросы загрязняющих веществ автомобилями, на основе директивы 70/220/ЕЕС. Этот документ включал в себя детальные стандарты, методики испытаний и пределы выбросов, направленные на борьбу с увеличивающимся загрязнением атмосферы от автотранспорта [52].

В аналогичный период, Соединенные Штаты Америки также приняли схожие регуляторные акты. В их первых нормативных документах содержание загрязняющих веществ было указано в процентном соотношении или в частях на миллион (ppm) [53]. На современном этапе уровень концентраций измеряют как:

- автомобили легкового класса: выбросы  $\text{CO}_2$  на километр [г/км] или на милю [г/миля];
- коммерческие автомобили: выбросы углекислого газа на генерируемую мощность [г/кВт·ч] или [г/л.с.·ч].

Пассажирские транспортные средства подвергаются тестированию на динамометрическом стенде, в то время как для грузовых автомобилей тестирование выбросов осуществляется с использованием специально установленного на испытательный стенд двигателя. Методы проведения таких испытаний могут варьироваться в различных государствах.

### **1.6.1 Ездовой цикл**

Водительский цикл представляет собой последовательность данных о скорости транспортного средства во времени, моделирующую обычное поведение водителей на дорогах. Эти циклы широко применяются в исследованиях влияния автомобильных выбросов на окружающую среду, в

расчетах потребления топлива и в оценках эффектов от автомобильного трафика. Несмотря на обширное использование, в Ирландии еще не разработан специализированный водительский цикл, в полной мере отражающий особенности местного движения. Для анализа экологического следа ирландские ученые обращались к Европейскому водительскому циклу (ECE) и к Новому европейскому водительскому циклу (NEDC), однако данные модели могут быть неточны, поскольку стили вождения значительно отличаются между регионами. Мировой опыт, включая исследования, проведенные в Китае, подтверждает, что существуют заметные различия между поведением водителей в реальных условиях и представленными в стандартных циклах, что обусловлено уникальными социокультурными, экономическими и географическими характеристиками каждой страны [54].

На максимальных скоростях работы двигателя функция задержки открытия впускного клапана способствует эффективному достижению максимальной мощности.

На рисунке 15 подробно демонстрируются аргументы, приведенные в анализе. Штриховые линии на диаграмме символизируют задержанный момент открытия впускных клапанов (IVO), в то время как сплошные линии обозначают преждевременное IVO, происходящее до достижения верхней мертвой точки (ВМТ). Из данных следует, что отсроченный IVO способствует увеличению индикаторного момента эффективного давления (IMEP), особенно при высоких оборотах двигателя и при максимально открытом положении дроссельной заслонки [55].

### **1.6.2 Городской цикл и внегородской цикл**

Для проведения испытаний двигатель устанавливается на динамометрическое шасси, которое оборудовано технологией эмуляции различных условий эксплуатации, включая нагрузку и инерцию. Это позволяет имитировать реальные условия работы двигателя. Для обеспечения точности результатов тестирования предпринимаются меры по минимизации вибраций динамометра, что критично, чтобы избежать искажения данных.

Общая продолжительность испытания составляет 1180 секунд и разделяется на два этапа: первый этап включает повторение четырех урбанистических ездовых циклов, а второй этап симулирует один загородный цикл езды.

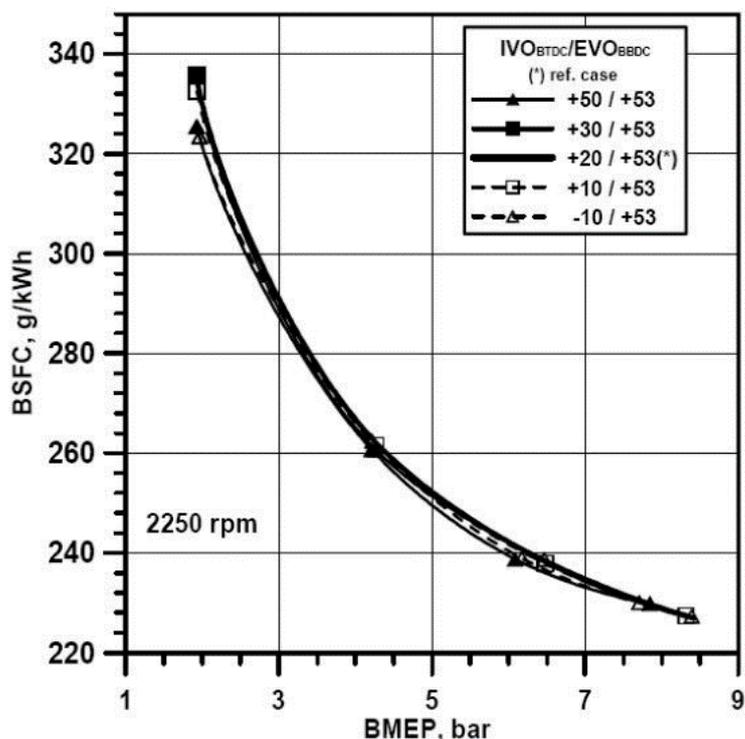


Рисунок 15 – BSFC с частичной нагрузкой при постоянной скорости [11]

В таблице 1 указывается рабочий цикл испытаний для имитации городского режима езды на динамометрическом стенде, где длительность одного такого цикла достигает 195 секунд. Однако в таблице 2 показан рабочий цикл на динамометрическом стенде шасси загородного цикла езды. Видно, что общее время одного внегородского цикла составляет 400 с [56].

Таблица 1 – Разбивка по фазам городского цикла езды

Фаза	Время (с)	% от общего
На холостом ходу	60	30,5
Холостой ход, автомобиль в движении, сцепление включено	9	4,6
Переключение передач	8	4,1
Ускорение	36	18,5
Стабильная скорость	57	29,2
Замедление	25	12,8
Общий	195	100

Таблица 2 – Распределение по фазам цикла езды за городом

Фаза	Время (с)	% от общего
На холостом ходу	20	5
Холостой ход, автомобиль в движении, сцепление включено	20	5
Переключение передач	6	1,5
Ускорение	103	25,8
Стабильная скорость	209	52,2
Замедление	42	10,5
Общий	400	100

Этот протокол тестирования автомобиля разработан для имитации типичного урбанистического автопробега, отражающего эксплуатационные условия на городских трассах. В процессе испытаний фиксируется сниженная скорость движения, уменьшенная рабочая нагрузка на мотор и пониженный уровень температуры отработанных газов. Обновлённый Новый Европейский Цикл Вождения (NEDC) демонстрирует как полноценный городской, так и загородный маршруты, согласно рисунку 16 [57].

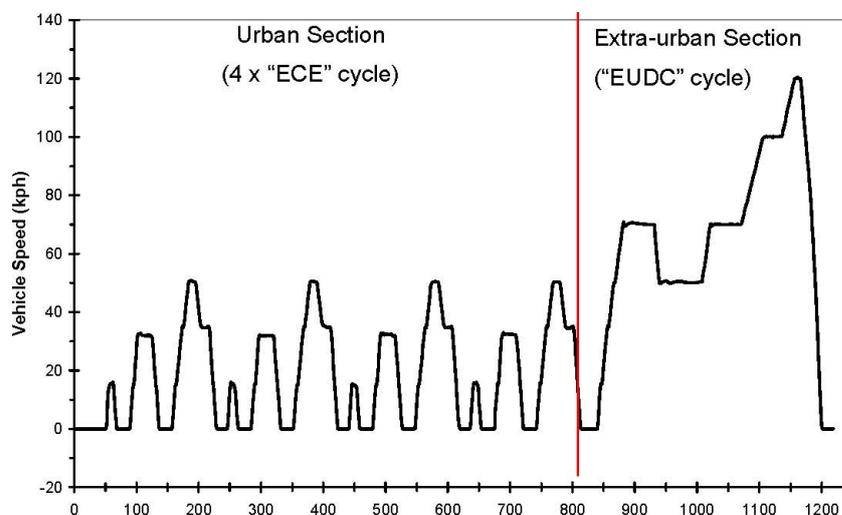


Рисунок 16 – Реализация ездового цикла NEDC

1. Анализ среднего уровня выбросов в атмосферу после запуска двигателя в холодном состоянии
2. Выбросы CO на холостом ходу
3. Выбросы картерных газов
4. Эксперимент по анализу испарительных выбросов
5. Тестирование надежности систем очистки от загрязнений

6. Измерение уровня средних низких температур окружающего воздуха и анализ эмиссии углеводорода в атмосферу после запуска двигателя на холодную.

7. Тест OBD

Бензиновые двигатели подвергаются комплексу проверок, в отличие от дизельных агрегатов, которые проходят только тесты 1, 5 и 7 при соответствующих условиях [58].

### **1.6.3 Эмиссионные лимиты. Легковые автомобили и малотоннажный транспорт (до 2500 кг)**

Транспортные средства на автомобильном топливе значительно ухудшают атмосферное воздуха из-за эмиссии вредных выхлопов. Это существенно влияет на экологическое благополучие, ведет к ухудшению состояния окружающей среды и способствует развитию заболеваний сердечно-сосудистой системы и респираторных проблем. Для минимизации негативного влияния транспорта на качество воздуха, актуальным является внедрение и соблюдение строгих нормативов выбросов для новых машин [59].

В 1993 году Европейский Союз впервые принял нормативы по уровню выхлопных газов для автомобилей и легких грузовиков, известные как нормы «Евро». Данные регуляции были разработаны с целью минимизации выбросов от автотранспорта и поддержания чистоты атмосферного воздуха. С момента их первого внедрения, сфера применения стандартов Евро расширялась посредством введения новых, более строгих версий. В январе 2005 года был обязательно реализован стандарт Евро-4 на территории всего Европейского континента. На сегодняшний день норматив Евро-5 был официально принят в 2009 году, а введение норматива Евро-6 запланировано на 2014 год [60].

Изначальной задачей Еврокомиссии было реализовать стандарт Евро-5 к середине 2008 года. Однако этот процесс был задержан, чтобы обеспечить автопроизводителям необходимый период для испытаний и выпуска адаптированных моделей.

Нормы Евро-5 предназначены для более строгого контроля над эмиссией угарного газа, оксидов азота, углеводородов и частиц сажи. Они созданы с целью устранения пробелов в регулировании, которые позволяли внедорожникам и автомобилям с полным приводом обходить ограничения, установленные стандартами Евро-4. Кроме того, Евро-5 ставит своей задачей существенно снизить различие в уровне загрязнений, производимых бензиновыми и дизельными двигателями, особенно в отношении оксидов азота и твердых частиц [61].

С введением норм Евро-3 стало обязательным оснащение всех автотранспортных средств системой бортовой диагностики (ОБД), целящей в мониторинге эмиссии загрязняющих веществ. По закону, оператор или владелец автомобиля должен быть оповещен о каждом снижении эффективности системы уменьшения выбросов, способном вызвать превышение установленных лимитов загрязнений [62].

Для идентификации баз данных в США отличия от европейских, используется термин EOBD (European On-Board Diagnostics). Критерии определяются на основе испытаний New European Driving Cycle (NEDC).

#### Выводы по первой главе

Выполненный обзор литературы показал перспективы применение современных технологических решений для снижения токсичности современных атмосферных автомобильных двигателей. Показано что на выбросы токсичных компонентов влияет множество факторов и без применения гибких систем искусственного интеллекта невозможно учесть их все для получения минимальных значений по токсичности.

## **Глава 2 Методологии оценки эмиссий**

### **2.1 Методики подсчета эмиссий и информационные массивы**

Можно классифицировать методики определения показателей выбросов загрязняющих веществ и потребления топлива на два вида:

- модель средней скорости;
- модель мгновенных выбросов.

#### **2.1.1 Модель средней скорости**

В оценке эмиссий, возникающих в результате дорожного движения, часто применяется метод, основанный на анализе средней скорости. Этот метод рассматривает агрегированную информацию об эмиссиях, связанных с разнообразными стилями вождения. Параметры, такие как средняя скорость, категория, размер и год выпуска автомобиля, вносятся в уравнение для вычисления функции эмиссии, зависящей от скорости передвижения. Однако этот метод не учитывает тот факт, что различные варианты вождения (то есть стили и динамики езды) при одинаковой средней скорости могут приводить к отличающимся показателям эмиссии и расходу топлива. Таким образом, применение данного подхода ограничивается лишь общими региональными и национальными оценками [63].

В рамках проекта MODEM, направленного на преодоление ограничений, характерных для моделей, основанных на измерении средней скорости, был разработан комплекс из 14 реалистичных профилей езды, основанных на детальном анализе уличного движения. Профили эти были применены для сбора данных о выбросах от разнообразных автомобилей, которые тестировались на динамометрическом стенде с имитацией шасси. В результате исследования были созданы детализированные диаграммы, демонстрирующие зависимость объемов выбросов загрязнителей вроде оксидов азота (NO<sub>x</sub>), углерода (CO), углеводородов (HC), диоксида углерода

(CO<sub>2</sub>) и потребления топлива от изменений скоростного режима в течение каждого из ездовых циклов [64].

### **2.1.2 Модель мгновенных выбросов**

Внедрение моделей мгновенных выбросов предназначено для преодоления ограничений, присущих модели средней скорости. Данный подход позволяет проводить непрерывное измерение уровней выбросов в процессе проведения тестирований на динамометрическом оборудовании, а также фиксировать полученные данные с определенной периодичностью (чаще всего раз в секунду). Для каждого мгновенного сочетания измеренных скорости и ускорения рассчитывается среднее значение выбросов, позволяющее затем сформировать функцию выбросов как двумерную таблицу скорости и произведения скорости на ускорение. Однако применение данного метода по-прежнему сталкивается с трудностями при анализе переходных выбросов в условиях резких ускорений, поскольку его эффективность ограничивается результатами, полученными исключительно во время испытаний на динамометрическом стенде [65].

## **2.2 Анализ и контраст методик оценки эмиссий автотранспорта**

Нормативные испытания, представленные на рисунке 17, охватывают проведение предварительных сертификационных процедур для транспортных средств, требуя от производителя подтверждения соответствия выпускаемых единиц установленным нормам по эмиссии газов. Этот процесс, известный как испытания на одобрение типа, осуществляется при помощи специализированного оборудования для измерения выбросов, размещенного на динамометрическом стенде [66].

Альтернативный метод – эксплуатационная диагностика и обслуживание. Данный метод включает в себя проведение теста на холостом ходу, выполняемого без применения внешней нагрузки к двигателю. Процедура включает использование газоанализатора, чей датчик

устанавливают в выпускной системе для определения уровня эмиссии загрязняющих веществ, выделяемых автомобилем [67].

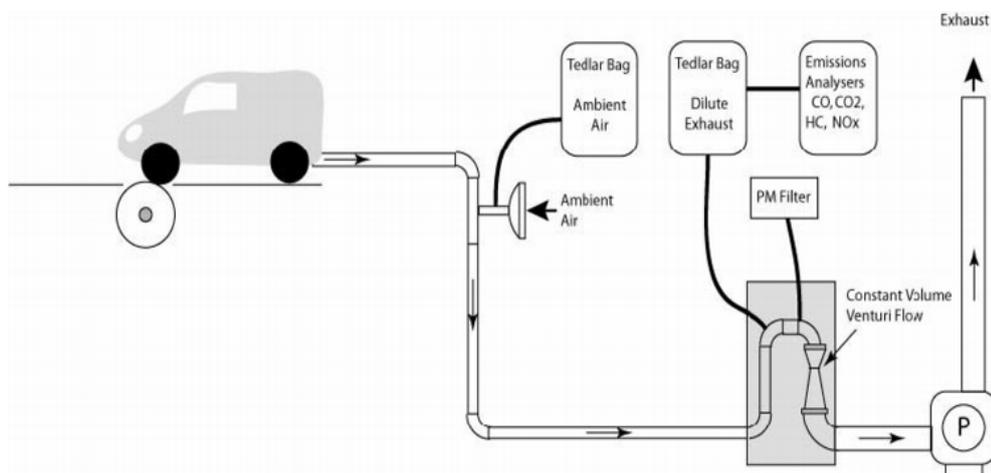


Рисунок 17 – Оборудование для испытаний на выбросы на динамометрическом стенде [16]

В определенных случаях, когда требуется более точное тестирование мотора, к нему могут быть применены дополнительные нагрузки для достоверности результатов. Однако, это может влечь за собой увеличение расходов. Современные системы onboard diagnostics (OBD), встроенные в автомобили, обеспечивают эффективное обнаружение неисправностей компонентов транспортного средства.

В контексте надзора за выбросами на транспортных артериях выделяют две категории испытаний на выбросы [68]:

1. Аппаратура для контроля атмосферы предназначена для определения уровня загрязнения воздуха путем измерения концентраций вредных выбросов [68]. Для получения образцов воздушной среды и, в определенных случаях, выбросов твердых частиц или углеродсодержащих соединений, применяется специфический насос. Собранные выборки подлежат дальнейшему лабораторному анализу [69]. Данный метод оценки рекомендован преимущественно для исследования коллективного воздействия автомобильного парка, в

отличие от анализа выбросов отдельных единиц транспорта [70]. В качестве примера применения, устройства устанавливаются в туннелях для сбора данных о концентрациях CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и углеводородов (НС), что позволяет оценить общий уровень загрязнения от автотранспорта [71].

2. Применение дистанционного зондирования на автомобильных дорогах включает установку специализированных устройств (рисунок 18) вблизи дорожного полотна для детектирования уровня выбросов от проезжающих автомобилей. Эти высокотехнологичные измерительные инструменты, созданные научными работниками, способствуют глубокому изучению и анализу степени загрязнения, выраженной через выбросы углекислого газа (CO), оксидов азота (NO), углеводородов (НС) и твердых частиц (PM). Такой подход к мониторингу окружающей среды на дорогах показал свою высокую эффективность в различных географических условиях, обеспечивая точное определение объема загрязняющих веществ, испускаемых автотранспортом, и способствовал улучшению экологических показателей, включая снижение расхода топлива за счет оптимизации показателей выбросов. Однако несмотря на достижения в данной области, методика пока не позволяет получить полную информацию о режимах работы автомобиля в момент измерения, например, переключения передач или уровня оборотов двигателя.

Эффективность стандартных измерительных техник ограничена. Важно выполнить динамическое тестирование шасси [72]. В процессе оценки шасси можно применять одновременные методы, анализируя как спонтанные, так и структурные вариации, а также проводить интегративные замеры веса, что является ключом к получению сертификата [73].

Применение симулированных драйв-циклов в тестировании шасси на динамометрических стендах зачастую не воспроизводит актуальные условия

эксплуатации [74]. Этот метод покрывает только часть возможных сценариев передвижения [75].

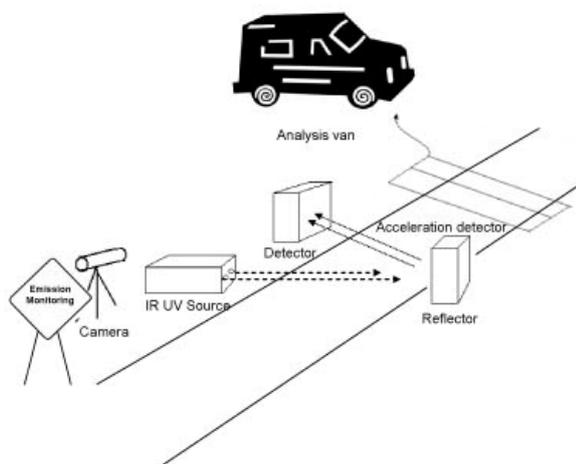


Рисунок 18 – Оборудование для дистанционного измерения выбросов транспортных средств [73]

В связи с этим, специалисты провели обширные научные работы с целью разработки автентичных моделей ездовых циклов. Сопоставление данных циклов выявило вариативность в показателях выбросов загрязняющих веществ. Применение систем онбордового контроля выбросов для зафиксирования реального времени уровней выбросов значительно упрощает процесс сбора информации, что в свою очередь снижает расходы на проведение тестов и позволяет более точно анализировать профили движения и факторы выбросов загрязняющих веществ.

Выявлено, что совпадение фактических и предположительных эмиссий  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$  составляет около 5% [76], тогда как для углеводородов (HC) и оксида углерода (CO) этот показатель находится в районе 10% [77]. Множество научных работ было посвящено использованию приборов для измерения выбросов в атмосферу с целью определения их моментальных значений.

К примеру, в исследовании, проведенном Аялой и коллегами, были классифицированы разнообразные формы углеводородов, эмитируемых через выхлопную систему [78].

В предыдущих обсуждениях отмечалось, что анализ выбросов, проведенный для конкретного транспортного средства, требует верификации через применение специализированного измерительного прибора, монтируемого на объекте исследования [79]. Исследования выявили, что одной из детерминант, оказывающих влияние на объем выхлопных газов, является манера управления транспортным средством водителем [80]. Аналогичным образом, пробки подверглись анализу как фактор, оказывающий непосредственное воздействие на интенсивность выбросов [81]. В таблице 3 представлено сопоставление различных подходов к измерению уровня выбросов от автотранспорта.

Таблица 3 – Анализ и сопоставление подходов к оценке эмиссий автомобилей

Тип измерения	Эксплуатация автомобиля			Измерение выбросов		Комментарии
	Известно	Воспроизводимый	Репрезентативность	Единицы измерения	Резолюция	
Тест выпускной системы на холостом ходу	Да	Да	Плохая	Концентрация	Пройден/Не пройден	Полный цикл тестирования флотилии выполнен, но количественные результаты не сохранены в архиве.
Бортовая диагностика (OBD)	Да	Нет	Хорошая	Относительно ожидаемого	Пройден/Не пройден	НЕТ зарегистрированных количественных данных
Окружающий	Нет	Нет	Хорошая	Пропускная способность канала передачи данных	Низкий	Составление средних показателей эмиссии для транспортной единицы
Сателлитное дистанционное зондирование для изучения транспортных сетей	Возможно	Нет	Хорошая	Эмиссия на массу топлива	Хороший	Информация о конкретном транспортном средстве может быть задокументирована, однако его оперативный статус остается неопределенным.
Динамометр двигателя	Да	Да	Плохая	Масса в единицу времени	Отличный	Облегченные процессы тестирования эффективности мотора. Сложности в имитации эксплуатационных условий.
Динамометр шасси	Да	Да	Умеренная	Масса в единицу времени	Отличный	Точные и обширные анализы, эффективное воспроизведение результатов, однако стоимость испытаний высока.
Бортовой, используемый	Да	умеренный	Хорошая	Масса в единицу времени	Хорошая	Тщательные и обширно представительные замеры. Возникновение трудностей при репликации условий эксперимента.

## **2.3 Анализ и сопоставление подходов к моделированию эмиссии автотранспорта**

Для анализа уровня выбросов в атмосферу, связанных с транспортом, разработаны разнообразные методы моделирования [81]. Составление национальных реестров загрязняющих веществ на различных территориях (как, например, на уровне страны или отдельного штата) играет ключевую роль в измерении объемов загрязнений, управлении качеством воздуха и предпринимает шаги к уменьшению вредных выбросов, оказывающих негативное воздействие на здоровье людей и состояние экосистем.

Выполненные научные работы по созданию техник моделирования позволили точно оценить уровни выбросов углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), оксида углерода (CO), водорода (HC), оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и твердых частиц (PM) [80]. В ходе данных исследований были также рассмотрены дополнительные аспекты, например, выбросы, происходящие вследствие испарения топлива и выделение частиц износа от торможения [82]. В Европе и Северной Америке предпочтение отдают методологиям, основанным на средней скорости движения. Для целей этой дипломной работы наибольшее значение представляют данные, полученные с помощью COPERT (Компьютерная программа оценки выбросов транспортных средств, с алгоритмом, изложенным на рисунке 19).

Исследовательские работы, нацеленные на проверку достоверности программы COPERT, а также на анализ и сопоставление различных методик для оценки выбросов загрязняющих веществ, активно продвигаются. Экстром и его коллеги выявили соответствие в уровне выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) между данными, полученными с помощью COPERT, и измерениями, проведенными методом дорожного зондирования. Однако, в отношении угарного газа (CO) и углеводородов (HC), результаты, предоставленные COPERT, показали завышение по сравнению с замерами.



Рисунок 19 – Базовая методология COPERT III [71]

В контексте другого исследования, программа MOBILE6, ориентированная на оценку загрязнений, также подверглась сравнению с

данными, полученными непосредственно с дорожных датчиков, где были выявлены значительные расхождения. Смит и его команда предложили инновационный метод моделирования дорожных выбросов через создание VERSIT+, который, по сравнению с COPERT, продемонстрировал повышенную точность в оценках выбросов загрязняющих веществ.

Глобально применяемые в транспортной отрасли модели средней скорости сталкиваются с рядом проблем. Эти сложности обусловлены информацией о тестировании транспортных средств, особенностями эксплуатации транспортного парка, вызовами, связанными с изменением скорости, а также идентификацией локальных выбросов загрязняющих веществ [83].

Тем не менее, наблюдаются значимые корреляционные связи между прогностическими данными, полученными с помощью программ моделирования, и реальными результатами, зафиксированными при непосредственных измерениях.

#### Выводы по главе 2

Выполненное исследование демонстрирует, что для точного анализа горения важно использовать как общие подходы, такие как измерение давления с помощью датчиков, так и целенаправленные методы, позволяющие изучить, как состав топливно-воздушной смеси влияет на скорость и механизм химических реакций сгорания.

## **Глава 3 Обзор результатов экспериментальных исследований**

### **3.1 Модель реализации LabVIEW**

Так как встроенное программное обеспечение, поставляемое вместе с устройством для считывания данных из базы данных автомобиля, не предусматривало функции сохранения данных, возникла необходимость в разработке специализированного программного решения для архивации этих сведений в файле с удобным пользовательским интерфейсом, совместимым с Microsoft Office Excel. Для этой цели была использована платформа LabVIEW от компании National Instruments, предлагающая широкие возможности для программирования и адаптации под различные задачи. Разработанная система сбора данных об эмиссии была структурирована на четыре отдельных модуля в среде LabVIEW, что позволило оптимизировать их функционирование как по отдельности, так и в рамках взаимодействия друг с другом. Созданные модули включали в себя: компонент для мониторинга мгновенных выбросов, функционал для анализа загрузки при холодном старте автомобиля, инструмент для обработки и анализа собранных данных, а также модуль для осуществления последовательного обмена данными.

#### **3.1.1 Функционал реального времени для анализа эмиссий**

Для того чтобы эффективно внедрить систему непрерывной оценки уровня выбросов, необходим был компонент, способный анализировать обороты двигателя и его нагрузку как исходные данные. Ожидалось, что на основе этих параметров будет производиться обращение к двумерным таблицам выбросов, представленным в электронном виде таблицы с переменными, отделёнными друг от друга запятыми (формат CSV), и загруженным в оперативную память ПК.

Принято решение применить участок программного кода, который был особо разработан экспертом в среде LabVIEW. Данный участок программы выполнял задачу билинейной интерполяции, обрабатывая две переменные для

осуществления поиска значений в двумерной структуре данных, аналогичной картам эмиссий. Чтобы адаптировать фрагмент кода к заданным требованиям, потребовалось создание дополнительного модуля. Этот модуль должен был обеспечить непосредственное сопоставление индексов в массиве с входящими данными. Достигнуть этой цели удалось через элементарное исследование в Excel. В документации, на рисунке 20, представлено как вычислялась функция для индексации на основе частоты вращения двигателя. Та же процедура применялась и для вычисления функции индексации, связанной с нагрузкой двигателя.

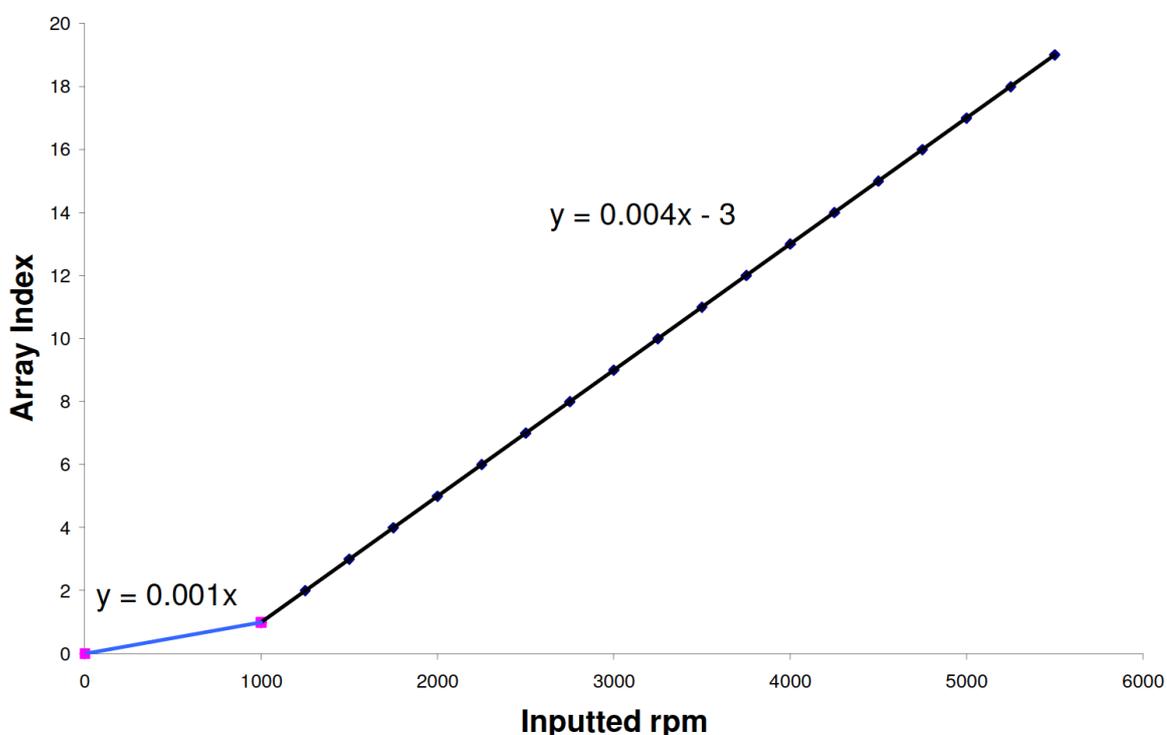


Рисунок 20 – Уравнения масштабирования индексации массива

На графике, изображенном на рисунке 20, представлены формулы, демонстрирующие методику масштабирования измеренных значений частоты вращения двигателя перед использованием их в операции билинейной интерполяции. Визуальное представление алгоритма работы модулей индексации в среде LabVIEW представлено в блок-схеме на рисунке 21.

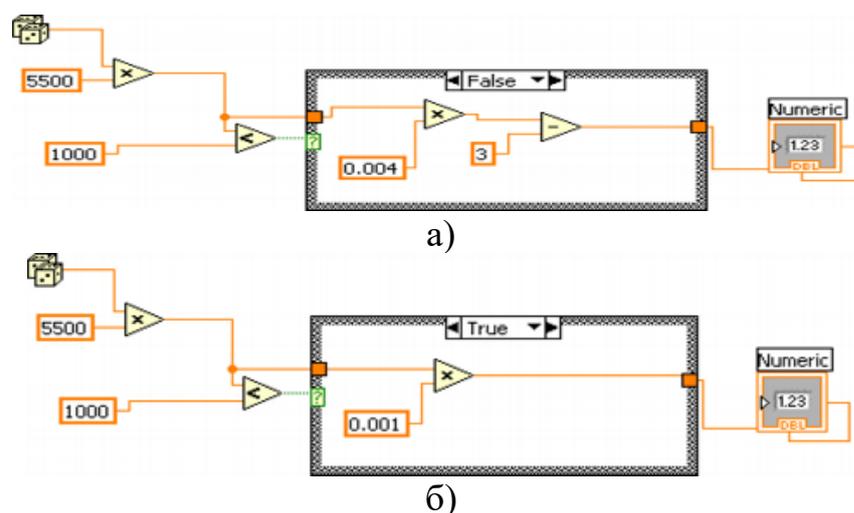


Рисунок 21 – Иллюстрация показывает, как выполняется индексация данных массивов в LabVIEW, где: (а) применяется для диапазона частот вращения от 1000 до 5500 об/мин; (б) используется для обработки частот вращения до 1000 об/мин.

Применение структур Case VI в LabVIEW позволило корректно масштабировать заданный параметр в соответствии с его значением.

После подтверждения корректности функционирования билинейной интерполяции с помощью виртуальных инструментов (VI), она была внедрена в четырехкратном исполнении внутри конструкции «цикла while» для эффективного выявления аномальных показателей выбросов и составления детализированных карт потребления топлива на основе мгновенных данных о выбросах и расходе топлива (рисунок 22). Полученные мгновенные данные о выбросах и потреблении топлива далее транслировались посредством использования сдвигового регистра. Основная задача сдвигового регистра заключалась в агрегации мгновенных данных для формирования суммарной оценки выбросов, адаптированной к условиям конкретного путешествия. В заключительной фазе, для обеспечения визуализации модели выбросов, был разработан пользовательский графический интерфейс, реализованный через набор управляющих элементов VI, предоставляемых средой разработки LabVIEW.

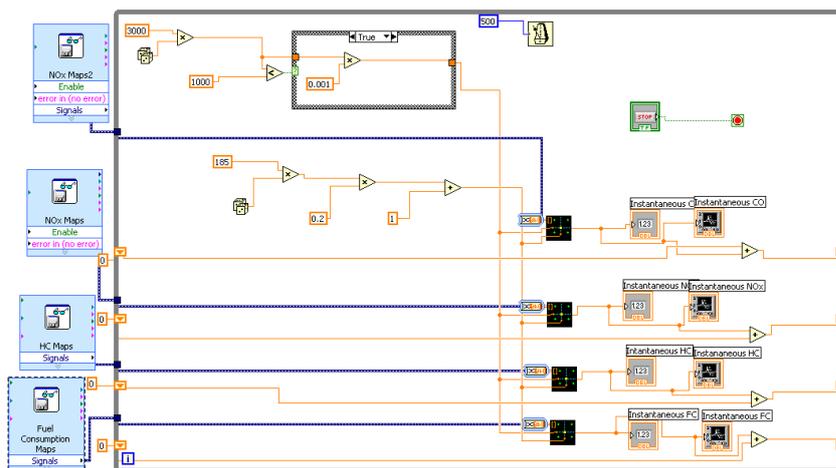


Рисунок 22 – Представляет собой схематическое изображение блока анализа эмиссий

Снимки экрана GUI и диаграмма выполнения алгоритма оценки эмиссий представлены на рисунке 23.

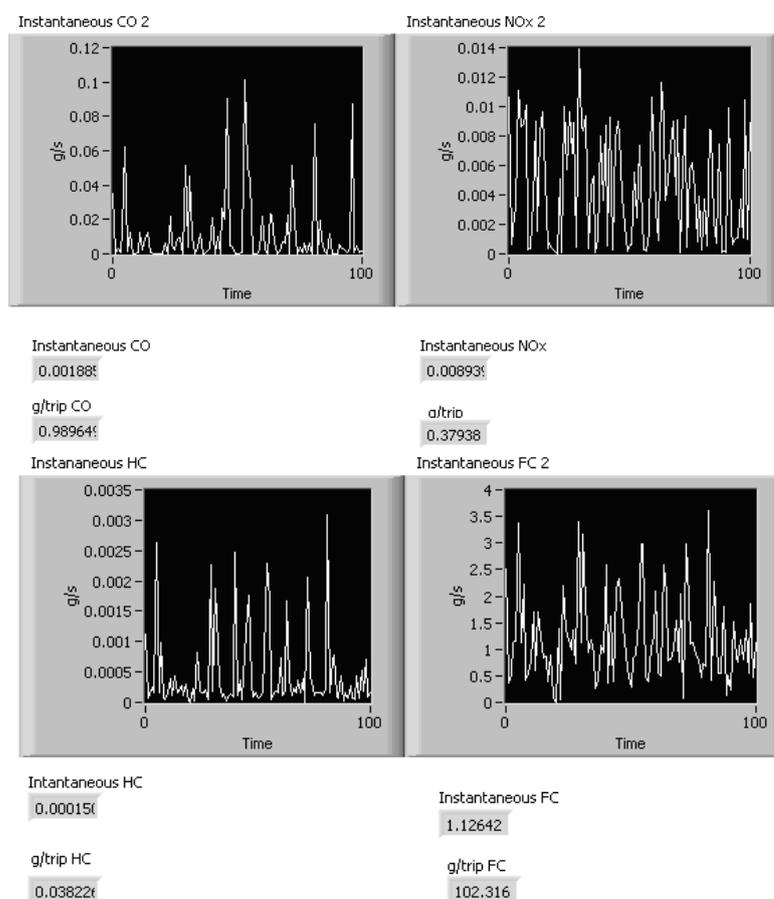


Рисунок 23 – Визуальный пользовательский интерфейс модуля анализа эмиссий

### 3.1.2 Модуль для процедуры холодного старта

После того как модель эмиссий холодного старта была успешно разработана и интегрирована, возникла необходимость в компоненте, отображающем уровень перерасхода топлива и интенсивность выбросов в атмосферу во время холодного пуска двигателя. Для адекватной функциональности модели необходимо было установить базовую температуру. В соответствии с американским стандартом тестового ездового цикла FTP75, двигатель считается достигшим рабочей температуры, когда температура его охлаждающей жидкости равна 23°C. Именно этот показатель был выбран в качестве оптимальной эталонной температуры для разрабатываемого компонента, мониторинга условий холодного запуска.

Так же, как и функционал индексации массивов частот вращения двигателя, механизм холодного пуска был воплощён через систему условий. Согласно дизайну этой системы, при высокой температуре охлаждающей жидкости, специфические действия не осуществлялись. В ситуации, когда значение температуры оказывалось меньшим предустановленного порога, активировалась коррекция величины с учётом заданных параметров холодного пуска. Это приводило к увеличению объёма выделенных загрязняющих веществ во время холодного запуска, которые впоследствии суммировались с текущим уровнем эмиссии, формируя итоговый показатель загрязнения на протяжении всего маршрута. Визуализация алгоритма холодного пуска демонстрируется на рисунке 24.

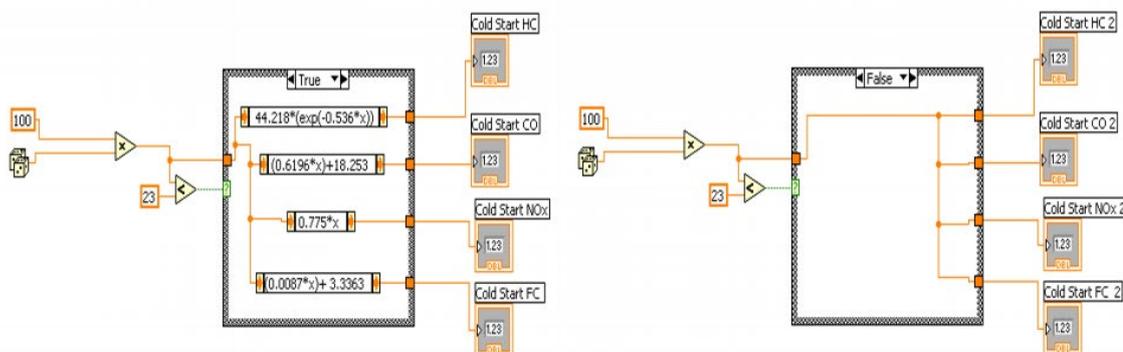


Рисунок 24 – Схематическое представление модуля для управления излишними выбросами в период холодного пуска

### 3.1.3 Исследование и анализ моментальной скорости и ускорения транспортного средства с целью определения ездового профиля

Для моделирования идеального цикла движения с помощью специализированного ПО, был необходим компонент, осуществляющий детальный разбор динамики скорости и ускорения авто. В качестве главного параметра для него выступала скорость, измеряемая через диагностическую систему в километрах в час. Это число конвертировалось в метры в секунду путем деления на 3,6 для дальнейшего использования в расчетах. Значения мгновенной скорости подвергались процессам дифференциации и интеграции для определения скоростных изменений (в  $\text{м/с}^2$ ) и измерения общего пройденного пути (в метрах). Аналитические функции также включали в себя оценку пиковых показателей скорости, ускорения и торможения, что критически важно для всестороннего анализа стиля управления. Визуальное представление алгоритма функционирования модуля скорости демонстрировалось на рисунке 25.

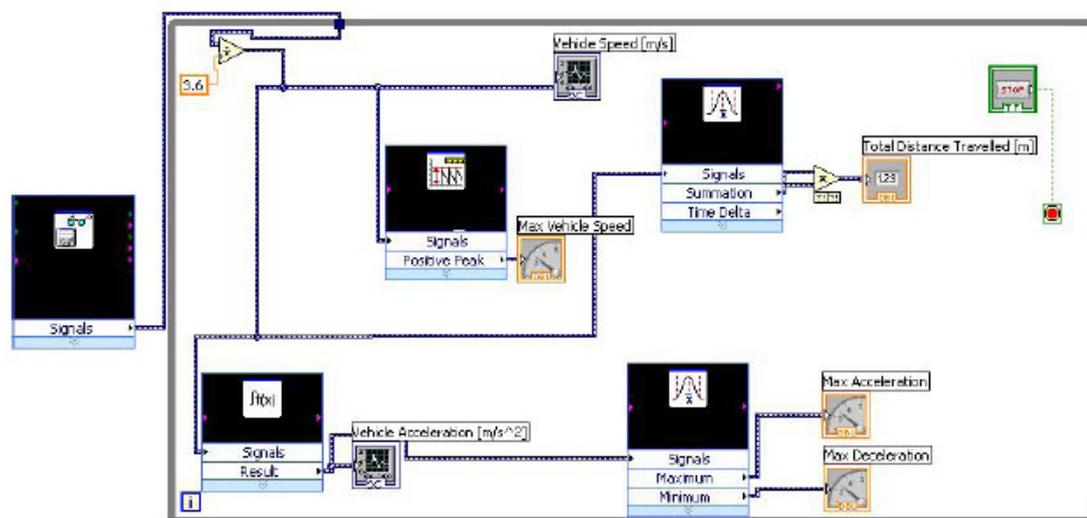


Рисунок 25 – Схематическое представление исполнения модуля для измерения скорости

### 3.1.4 Модуль анализа данных

Разработка модуля анализа данных представила серьезные трудности. Задачей модуля было преобразование шестнадцатеричных кодов различных

показателей автомобиля в понятные пользователю единицы измерения, такие как метры в секунду, обороты в минуту и т.д. На первом этапе модуль выполнял анализ OBD данных на соответствие определенным шаблонам (например, код 41 0С указывал на запрос данных о скорости вращения двигателя). Для идентификации соответствий использовался функционал VI «шаблон соответствия», включенный в программное обеспечение LabVIEW. В случае нахождения соответствия, VI либо автоматически выводил на экран следующий битовый токен в последовательности данных, либо предоставлял данные, смещенные на значение, задаваемое разработчиком. Полученные результаты соответствия VI затем переводились в десятичный формат и адаптировались под необходимые масштабы с вычетом коэффициентов, предусмотренных стандартами организации SAE [83].

Учитывая, что собранные данные представлены в последовательной форме, ввод структур Case оказался обязательным для обеспечения стабильности параметров транспортных средств, предотвращая их падение до нулевых значений в моменты временного прерывания аналитических функций (интервалы без получения данных).

Разработка структур вариантов была осуществлена с тем расчетом, что положительные значения передавались напрямую в индикатор. В случае, когда значение параметра достигало нуля, оно подвергалось обработке в цикле до нахождения значения, отличного от нуля и превышающего первоначально заданное значение. Блок-схема, демонстрирующая процесс работы модуля для синтаксического анализа данных, представлена на рисунке 26.

### **3.2 Типы выбросов и подходы к моделированию**

Транспортные средства производят три категории выбросов, включая один второстепенный и два принципиально важных типа. Минорным среди них выступают выбросы, возникающие в процессе испарения топлива (EEVAP), которые могут формироваться в топливной системе автомобиля,

включая бензобак, карбюраторную или инжекторную системы и топливопроводы.

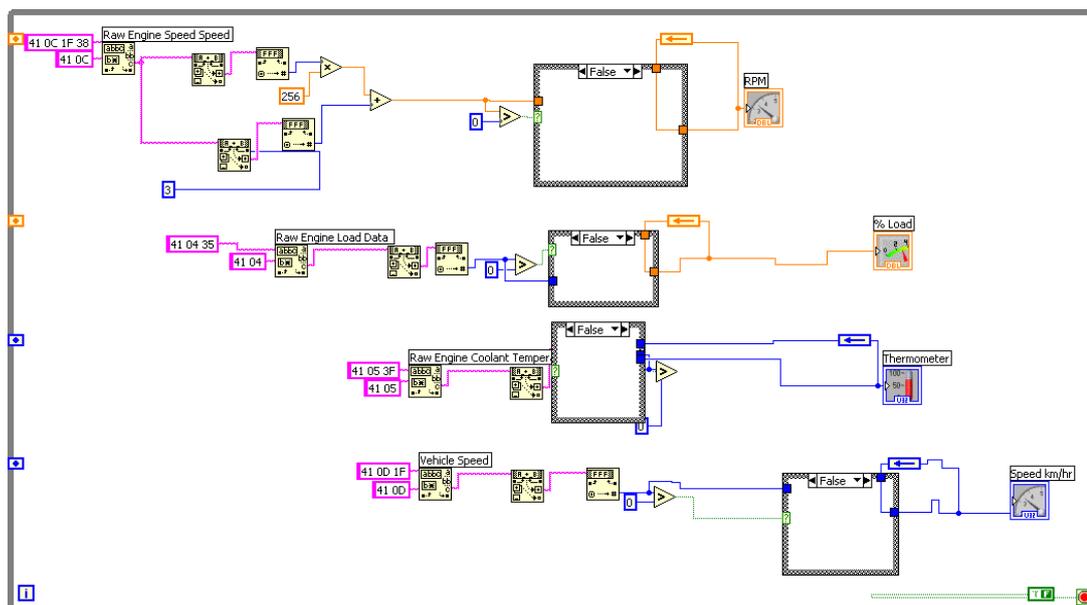


Рисунок 26 – Схематичное описание процесса реализации модуля для анализа синтаксиса данных

Эти эмиссии связаны с испаряемостью топлива и суточными изменениями температурных показателей.

В дизельных двигателях выбросы из-за испарения отсутствуют, что обусловлено низким давлением паров дизельного топлива (1 мбар при нормальной температуре окружающей среды). Проблематика испарительных выбросов (EEVAP) характерна исключительно для автомобилей на бензине. Дополнительно выделяют два значимых типа выбросов: эмиссии при холодном запуске двигателя (ECOLD), возникающие в фазу его нестабильной тепловой работы, и выбросы при перегреве двигателя (EHOT), характерные для периода его устойчивого горячего функционирования.

В рамках проведенного исследования применялся следующий числовой метод для анализа связи между предполагаемыми эмиссиями и фактическими данными (12):

$$EF_{(i,m,n)} = \left( \frac{\alpha + \gamma \cdot \chi + \varepsilon \cdot \chi^2 + \zeta \cdot \chi^{-1}}{1 + \beta \cdot \chi + \delta \cdot \chi^2} \right) \cdot (1 - RF) \quad (12)$$

где  $EF_{(i,m,n)}$  – предполагаемая токсичность;

$\chi$  – коэффициент тепловыделения;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;

$\gamma$  – коэффициент остаточных газов;

$\varepsilon$  – степень сжатия;

$\zeta$  – коэффициент использования теплоты;

$RF$  – расход топлива;

$\beta$  – коэффициент недостатка воздуха.

### Выводы по главе 3

Выполнено моделирование в программе LabVIEW позволяющее проводить запись и первичный анализ экспериментальных данных. Показана достоверность разрабатываемых моделей.

## **Глава 4 Анализ выводов из экспериментов и моделирования токсичных выбросов в динамике ездовых испытаний**

Параметры, такие как скоростной режим, передача мощности и положения педалей газа, тормоза и сцепления, вместе формируют решение водителя. Поэтому, данное решение производит результаты, которые используются для анализа процесса движения транспортного средства. В таблице 4 демонстрируется, как разнообразные характеристики автомобиля влияют на выбросы загрязняющих веществ и потребление топлива (оксидов азота).

Таблица 4 – Влияние факторов манеры вождения на выбросы и расход топлива

Схема вождения	Топливо	СО	НС	НОКС
Замедление	Нет эффекта	Нет эффекта	Нет эффекта	Нет эффекта
Быстрое ускорение	Значительный	Значительный	Умеренный	Значительный
Стоп Фактор	Экстрим	Экстрим	Нет эффекта	Нет эффекта
Коэффициент колебания скорости	Незначительный	Незначительный	Нет эффекта	Нет эффекта
Умеренное ускорение	Незначительный	Незначительный	Нет эффекта	Нет эффекта
Экстремальное ускорение	Незначительный	Незначительный	Экстрим	Экстрим
Отсроченный переход между второй и третьей передачами	Незначительный	Незначительный	Незначительный	Умеренный
Скорость вращения двигателя превышает 3500 оборотов в минуту.	Нет эффекта	Нет эффекта	Незначительный	Незначительный
Проблема уменьшенной мощности мотора	Нет эффекта	Нет эффекта	Нет эффекта	Нет эффекта

### **4.1 Анализ результатов замеров при проведении экспериментов**

#### **4.1.1 Тестирование в режиме ожидания**

В течение десяти минут двигатель функционировал на устойчивом уровне оборотов. В процессе этой деятельности отмечалось легкое повышение уровня эмиссии вредных веществ. Эти временные скачки в эмиссии были вызваны различными аспектами, включая качество используемого топлива, эффективность работы каталитического нейтрализатора, уровень

техобслуживания двигателя, функционирование системы охлаждения и так далее. После завершения указанного временного отрезка, оператору рекомендовалось увеличить обороты двигателя, поддерживая их в диапазоне от 1400 до 1600 оборотов в минуту. На основе наблюдений было установлено, что с ростом оборотов двигателя происходило пропорциональное увеличение объема выбросов в атмосферу.

В динамике выбросов углекислых газов во время проведения десятиминутного экспериментального периода было зафиксировано их возрастание. Анализ данных показал, что с продолжительностью эксперимента концентрация углеводородов в выбросах эскалировала. Кроме того, была обнаружена прямая зависимость между ростом уровня выбросов углеводородов и повышением оборотов двигателя.

Уровень эмиссии углеводородов чувствителен к малейшим колебаниям положения дроссельной заслонки (лямбда), прямо связанным с количеством выделенного оксида углерода при одном и том же изменении лямбда. Концентрация монооксида углерода варьируется в ответ на корректировки лямбда.

С повышением числа оборотов происходит резкий рост объема выделяемого углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), после чего он снижается, но остается на уровне, превышающем исходные показатели. Это демонстрирует, что при стабильно высокой частоте оборотов двигателя на протяжении значительного временного промежутка, общее количество выбросов  $\text{CO}_2$  неуклонно возрастает. Обычно, при малом количестве оборотов, объем генерируемого углекислого газа выше, чем показатели эмиссии углеводородов, как это представлено на рисунке 27.

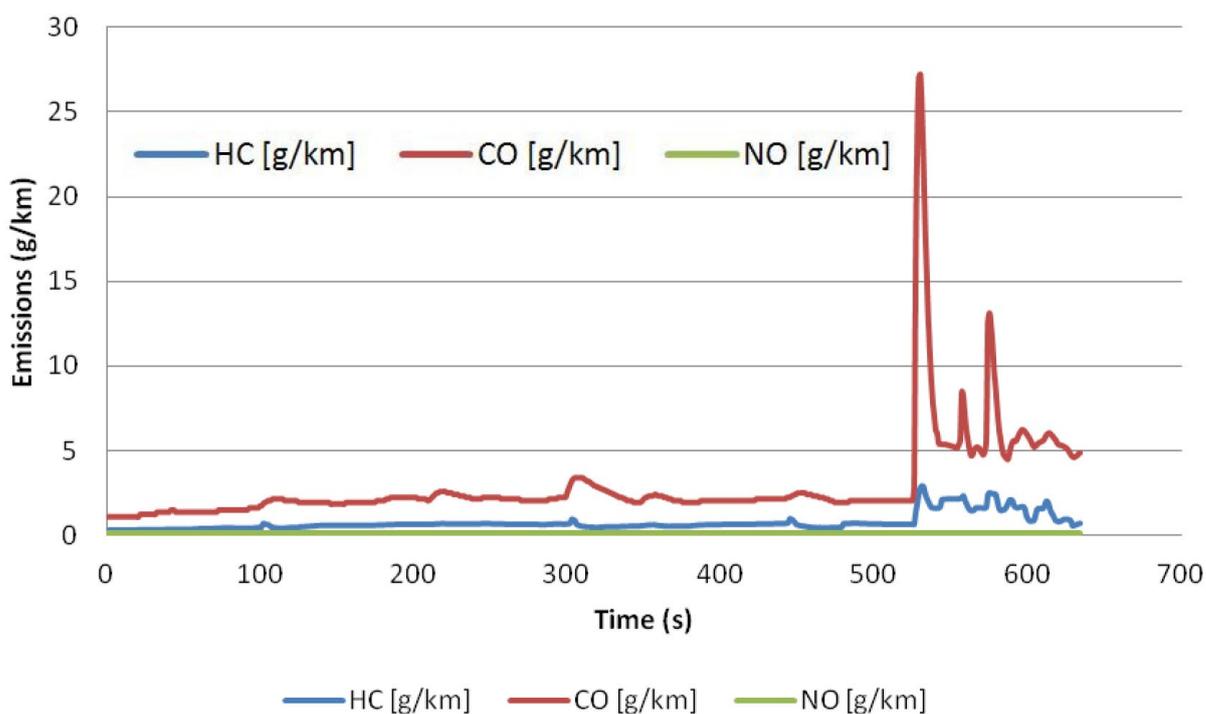


Рисунок 27 – Анализ сравнительных данных выбросов при испытаниях на стоянке

В рисунках 28 и 29 подробно демонстрируется структура выбросов углекислого газа и углеводородов, представляя, как варьируются эмиссии отработавших газов с ростом оборотов двигателя при проведении тестирования на холостом ходу. Каждый график визуализирует интервалы времени при стабильных и возрастающих оборотах, а также их воздействие на концентрацию загрязнителей в атмосфере: углеводороды (НС), оксид углерода (СО), и оксиды азота (NOx). Сравнительный анализ показателей НС и СО выявил, что в период простоя среднее содержание СО достигало 2,92 г/км, в то время как уровень НС оставался значительно ниже - всего 0,73 г/км. Эта зависимость особенно заметна на графиках, когда двигатель функционировал с частотой вращения коленчатого вала 770 об/мин.

Объем сгенерированных углеводородов достиг лишь 0,96 грамм на километр, в то время как для углекислого газа этот показатель равен 3,406 г/км. В дополнение, показатели углеводородов отличаются более выраженными и высокими пиками по сравнению с углекислым газом, что, в свою очередь, обусловлено ранее упомянутыми характеристиками.

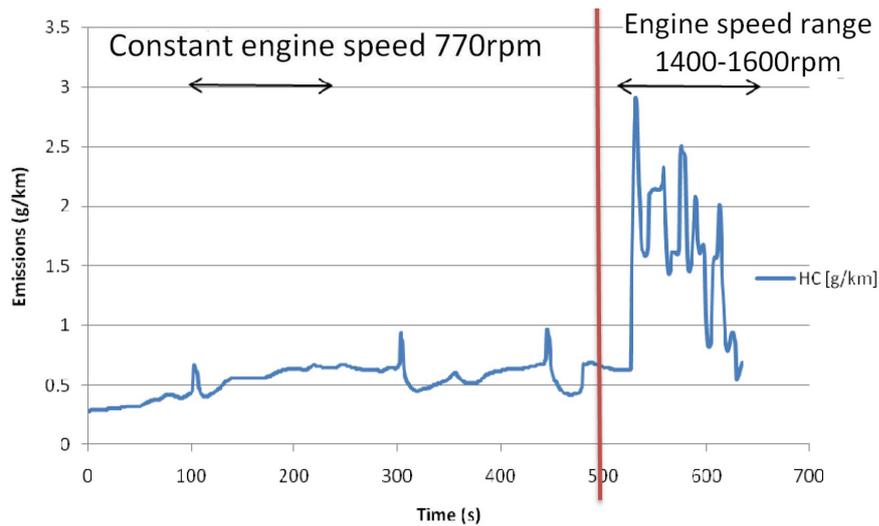


Рисунок 28 – Выбросы углеродсодержащих соединений в ходе статических тестирований

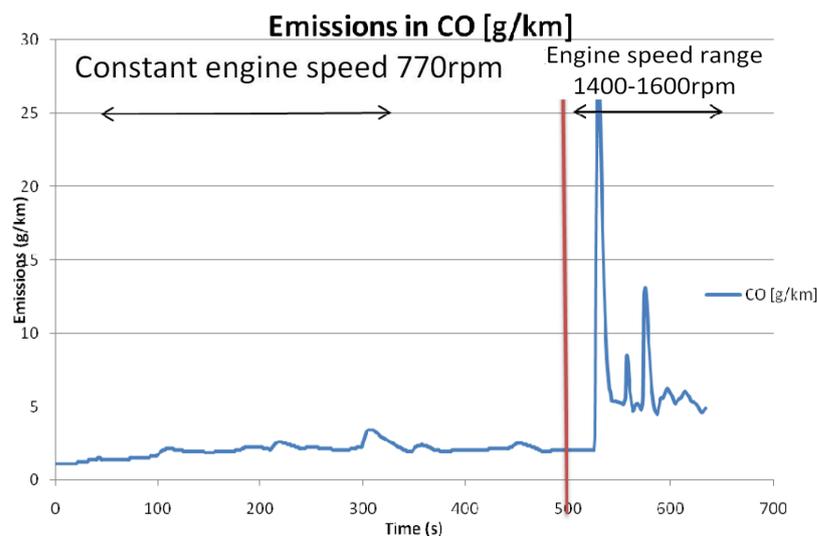


Рисунок 29 – Эмиссии угарного газа во время тестирования в статичных условиях

Можно сделать вывод, что за повышенные уровни выбросов оксида углерода (CO) и углеводородов (HC) отвечает механическое повреждение. Ключевой фактор повышенного содержания CO связан с избыточным поступлением топлива в двигатель, которое превышает его способность к окислению. Параллельно с ростом уровней CO происходит увеличение концентрации HC, тогда как уровни диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и оксидов азота (NO<sub>x</sub>) снижаются. Уровни CO должны оставаться неизменными при

стабильной частоте вращения двигателя, как это демонстрируют результаты проведенного анализа. Если частота вращения двигателя увеличивается, это может указывать на наличие проблемы, такой как вакуумная утечка или нарушение в системе контроля подачи топлива.

Механически неисправности представляют одну из основных причин повышенных уровней эмиссии углеводородов. Хорошо известно, что до процесса каталитической очистки любой двигатель генерирует определенное количество углеводородов, обычно это колеблется в пределах 150–250 частей на миллион. Существенные факторы, способствующие выбросам углеводородов, включают неправильную подачу топлива, механические и электрические сбои в работе двигателя, а также неисправности в системе каталитической очистки. Отмечается, что при наличии постоянных и высоких уровней выбросов  $\text{NO}_x$ , особенно в режиме холостого хода, можно утверждать об отсутствии механических неисправностей в системе, что подтверждается данными на рисунке 30. Важно также указать на то, что объемы выбросов  $\text{NO}_x$  существенно ниже по сравнению с другими видами эмиссии, что позволяет сделать вывод о незначительной роли  $\text{NO}_x$  в общем объеме выбросов, измеренных во время статических тестов, по сравнению с выбросами углеводородов (HC) и оксида углерода (CO), генерируемых в том же испытании.

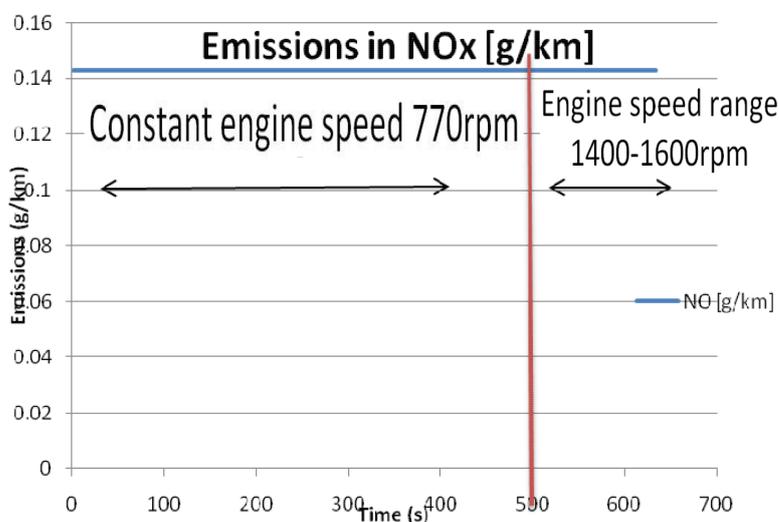


Рисунок 30 – Эмиссии  $\text{NO}_x$  во время тестирования на парковочном месте

#### 4.1.2 Короткий городской маршрут

В рамках исследования, анализировавшего загрязняющие вещества, особое внимание уделялось концентрациям оксида углерода (CO) и оксидов азота (NO<sub>x</sub>) на компактных городских маршрутах. Выводы подчеркнули значимость различий в стиле вождения по градообразующим факторам, оказывающим влияние на частоту возникновения и объем транспортных выбросов в условиях города. Рисунок 31 наглядно демонстрирует диспропорцию между количеством выделяемого CO и NO<sub>x</sub>, с явным преобладанием первого. Неожиданный оказался объем углекислого газа, значительно превосходящий предварительные ожидания, при средних показателях выбросов NO<sub>x</sub> в 0,22898 г/км и CO в 3,37 г/км за протяженность пути в 4,442 км. Итоги исследования показали, что сравнительный объем CO, выделяемый автомобилями на коротких городских дистанциях, почти в пятнадцать раз выше, чем NO<sub>x</sub>, с кумулятивным итогом в 1,01715 г для оксидов азота и 14,97135 г для оксида углерода.

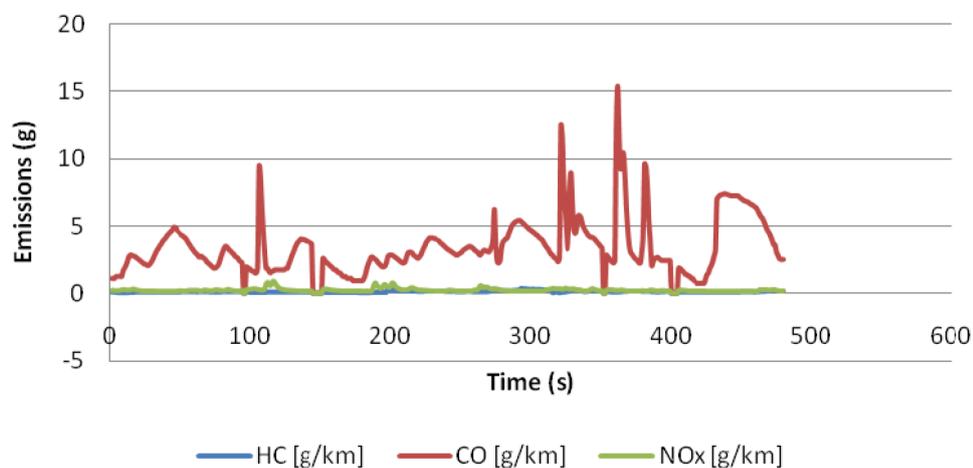


Рисунок 31 – Реальные эмиссии при выполнении короткого городского маршрута

Эмиссии, генерируемые во время процесса торможения, были минимизированы. На этапе остановки зафиксированы минимальные значения эмиссий. Тем не менее, наблюдается значительное различие в уровнях эмиссий при одинаковых условиях эксплуатации. Данные экспериментов

показывают, что произошло две остановки: первая на 150-й секунде, а вторая — на 350-й. После первой остановки последовало поступательное увеличение скорости до четвертой ступени трансмиссии, при этом каждая ступень активировалась не менее чем на 20-30 секунд перед сменой. Этот режим позволяет сделать вывод о том, что концентрация оксида углерода (CO) возрастает линейно, тогда как концентрация оксидов азота (NO<sub>x</sub>) увеличивается скачкообразно на промежуточных этапах. При высоких передачах уровень CO значительно выше, чем NO<sub>x</sub>. В то же время, при работе на низких оборотах и на пониженных передачах, концентрация NO<sub>x</sub> превышает уровень CO. Рисунок 32 демонстрирует взаимное соотношение данных эмиссий, выделяемых при схожих условиях.

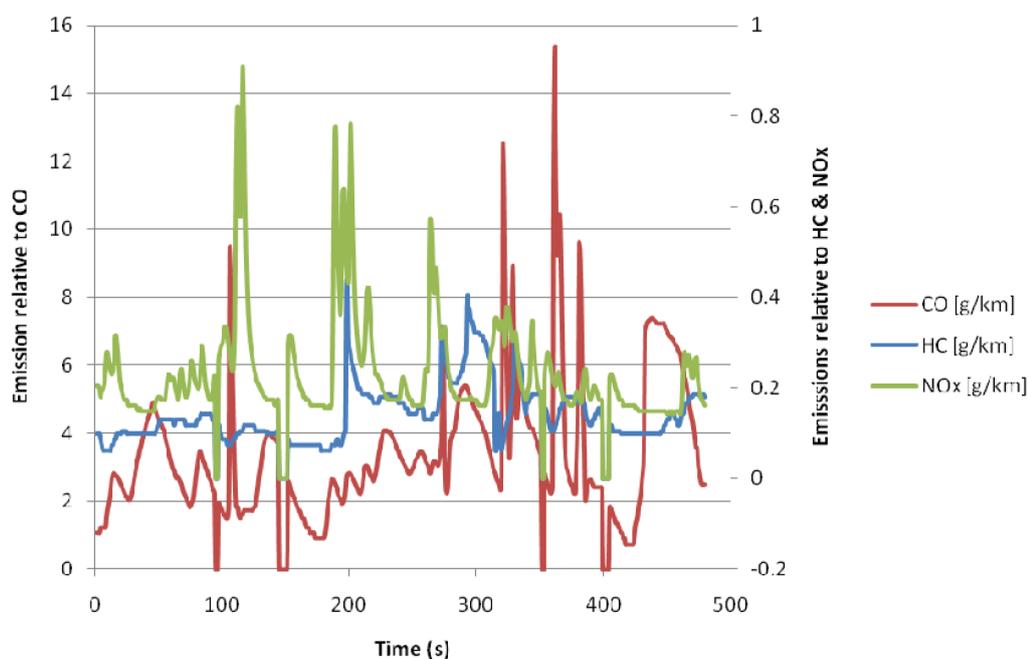


Рисунок 32 – Сравнение уровней выбросов

Из анализа данных о выбросах оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и угарного газа (CO), изображённых на диаграммах 33 и 34, очевидно, что методы управления автомобилем оказывают заметное воздействие на уровень эмиссий. В частности, после остановки на временном интервале в 350 секунд наблюдается резкое увеличение скорости, достигаемое через серию смен передач. При этом,

переход от одной передачи к другой происходил за сжатые временные промежутки, порой не превышающие 5 секунд.

На рисунке 33 представлен анализ влияния динамики вождения на эмиссию загрязняющих веществ, конкретно демонстрируется, что эмиссия оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) возрастает во время ускорения транспортного средства, достигая пика, однако с переключением на четвертую скорость, уровень выбросов существенно снижается до минимальных показателей. В отличие от этого, угарный газ ( $\text{CO}$ ) демонстрирует обратную тенденцию: при переходе к высшим передачам его концентрация в выхлопных газах заметно увеличивается.

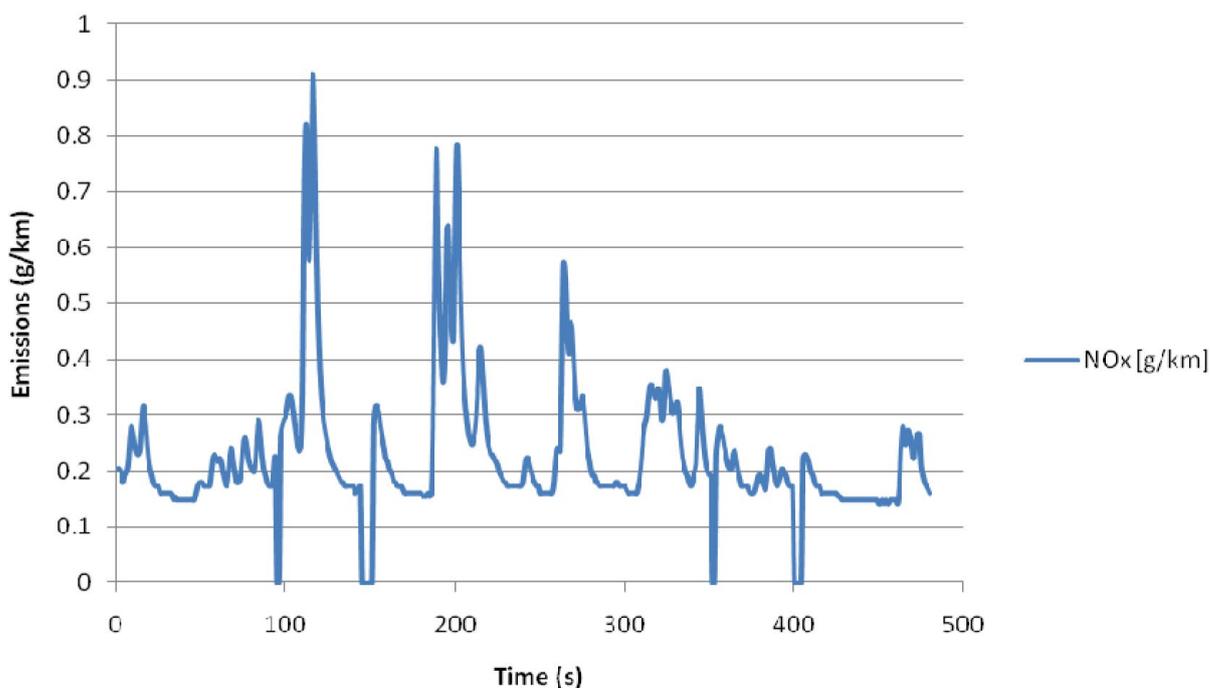


Рисунок 33 – Распределение выбросов  $\text{NO}_x$

В процессе управления транспортным средством, наблюдается стандартный порядок выбросов на протяжении всех фаз вождения. Отличие между выбросами заключается лишь в их общем объеме. Важно отметить, что существуют незначительные отклонения между двумя выбросами, генерируемыми в тот же временной интервал. Например, спустя 400 секунд, происходит изменение: уровень одного вида выбросов повышается, а другого

уменьшается. В этот период было обнаружено, что рост концентрации угарного газа (CO) сопровождается снижением уровня оксидов азота (NOx).

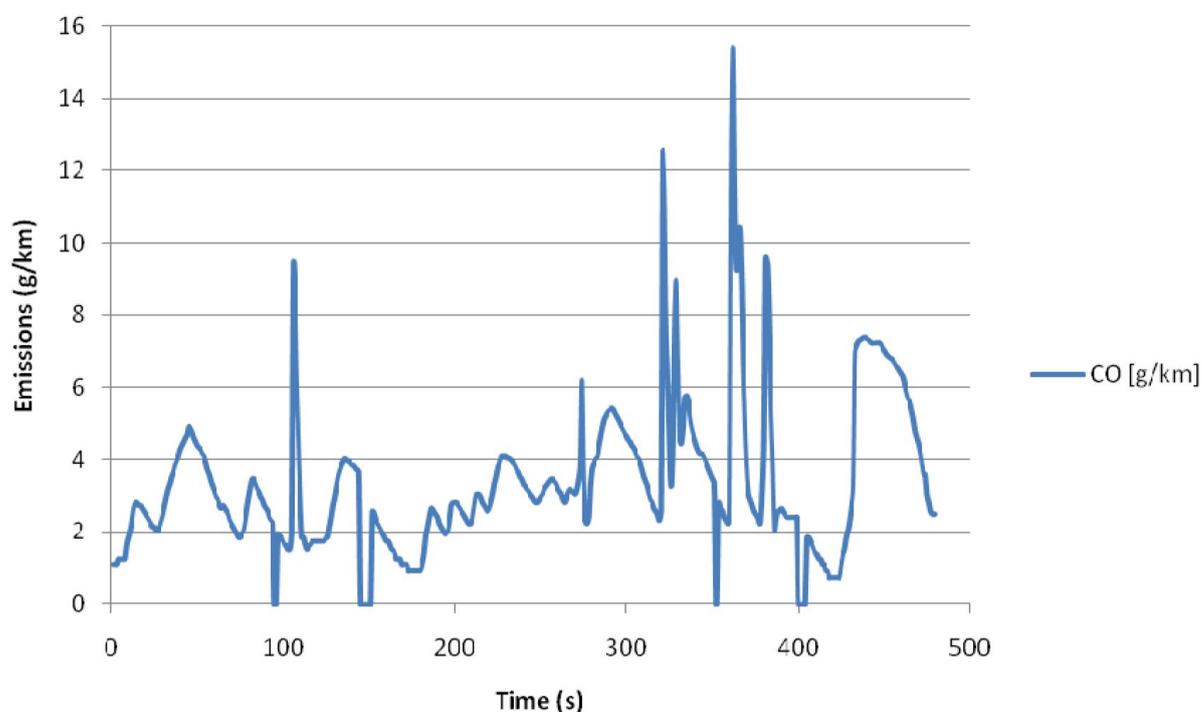


Рисунок 34 – Распределение выбросов CO в течение короткого городского цикла

Специфические причины этого феномена до конца не изведаны, что вызывает тревогу среди специалистов. Подобная динамика может быть связана с техническими ошибками при управлении, например, с одновременным нажатием на педали сцепления и газа. Такие действия могут спровоцировать повышение оборотов двигателя, что, казалось бы, должно привести к постоянству уровня NOx и росту CO. Тем не менее, реальность показывает иное. Это подчеркивает наличие неясностей касательно точных объемов выбросов, требующих дальнейшего детального исследования.

Из анализа видим, что выбросы демонстрируют очевидную закономерность. Во время понижения передачи (к примеру, переход с 2-й на 3-ю) и повышении оборотов двигателя наблюдается рост объема выбросов. Аналогично, при переключении на более низкую передачу и уменьшении оборотов двигателя, объем выбросов уменьшается.

### 4.1.3 DCU-испытание на автомагистрали

Регуляции дорожного трафика часто варьируются между различными населенными пунктами, хотя есть общие элементы, типичные для каждого города. Это наводит на мысль о необходимости систематизации условий дорожного движения. Такая систематизация может осуществляться с учетом детального анализа микротрафика, включая рассмотрение средней скорости движения и процента остановок в рамках каждой отдельной поездки. Для наглядности условия трафика классифицируются на основании времени, проведенного в пробках, и средней скорости движения, как демонстрируется в таблице 5. Так, состояние дорожного движения делится на городские улицы и шоссейные трассы:

Городские дорожные условия характеризуются транспортной интенсивностью, где транспорт испытывает постоянные задержки и остановки. Это приводит к колебаниям средней скорости передвижения в пределах от 10 до 35 километров в час, что отражает диапазон от низких до умеренных скоростей передвижения.

Автострада: непрерывный трафик с минимальной скоростью свыше 40 км/ч.

Используя данные пороговые значения, возможно продемонстрировать классификацию состояний дорожного трафика, как это отражено в таблице 5.

Таблица 5 – Классификация условий дорожного движения

Классификация	Средняя скорость (км/ч)	Время простоя (%)
Городской	10 - 35	<80
Автомагистраль	>40	<10

Испытание охватывало четыре разновидности траекторных испытаний, проходивших по уникальным путям. На рисунке 35 изображены траектории движения для каждого из маршрутов. Величина скорости поделена на четыре дистинктивных интервала, основанных на классификациях, описанных в

таблице 5. Важно подчеркнуть, что первый и второй циклы не соответствуют стандартным классификациям городского движения.

В указанных зонах характеризуются увеличенными скоростями передвижения и незначительным числом остановок, однако, их не корректно относить к категории автострад, хотя они могут служить как дополнение к автострадам или их продолжение. Эти дорожные направления оптимально подходят для междугородних перевозок, благодаря повышенным скоростным режимам в сравнении с теми, что характерны для городской инфраструктуры.

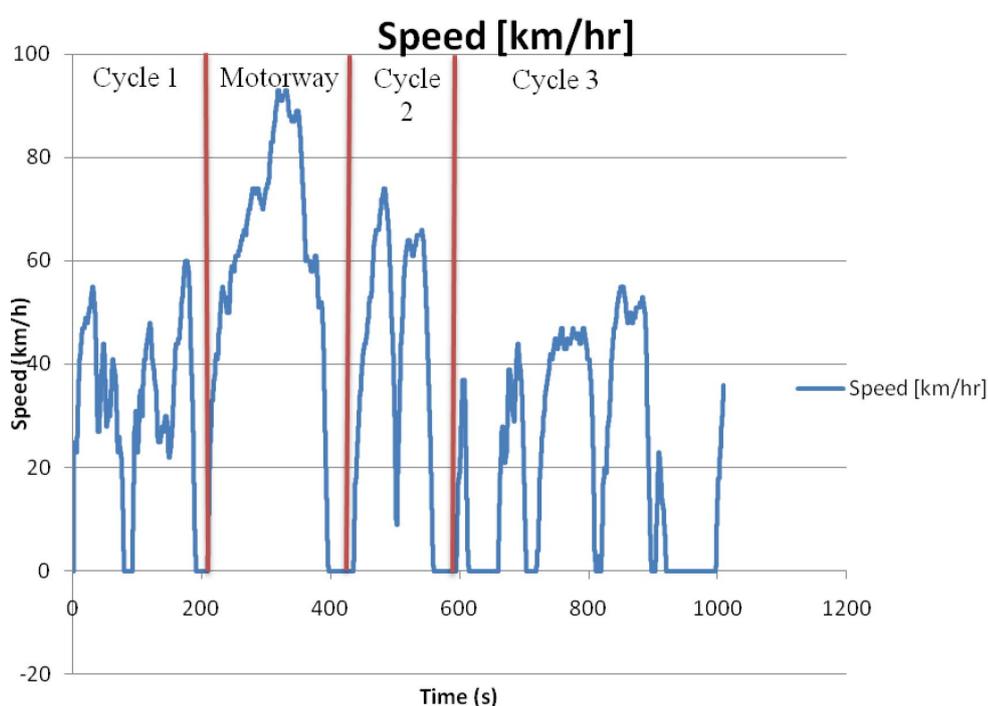


Рисунок 35 – Изменение скорости в ходе стандартизированного испытания на разных трассах городского движения

Анализ рисунка 36 демонстрирует, что основной объем эмиссий загрязняющих веществ происходит во время передвижения автомобилей по скоростным трассам в рамках данного цикла. В сравнении, эмиссии на других типах дорог показали значительно меньшие объемы выбросов на одинаковое количество километров. Тем не менее, более глубокий анализ этих данных привел к неожиданным результатам. В общей сложности, выбросы монооксида углерода (CO) и оксидов азота (NO<sub>x</sub>) на дистанции примерно в 6 км, были измерены в количестве 1,572 г и 0,175 г соответственно, с

усредненными показателями выбросов равными 0,2022 г для CO и 0,0384 г для NO<sub>x</sub>.

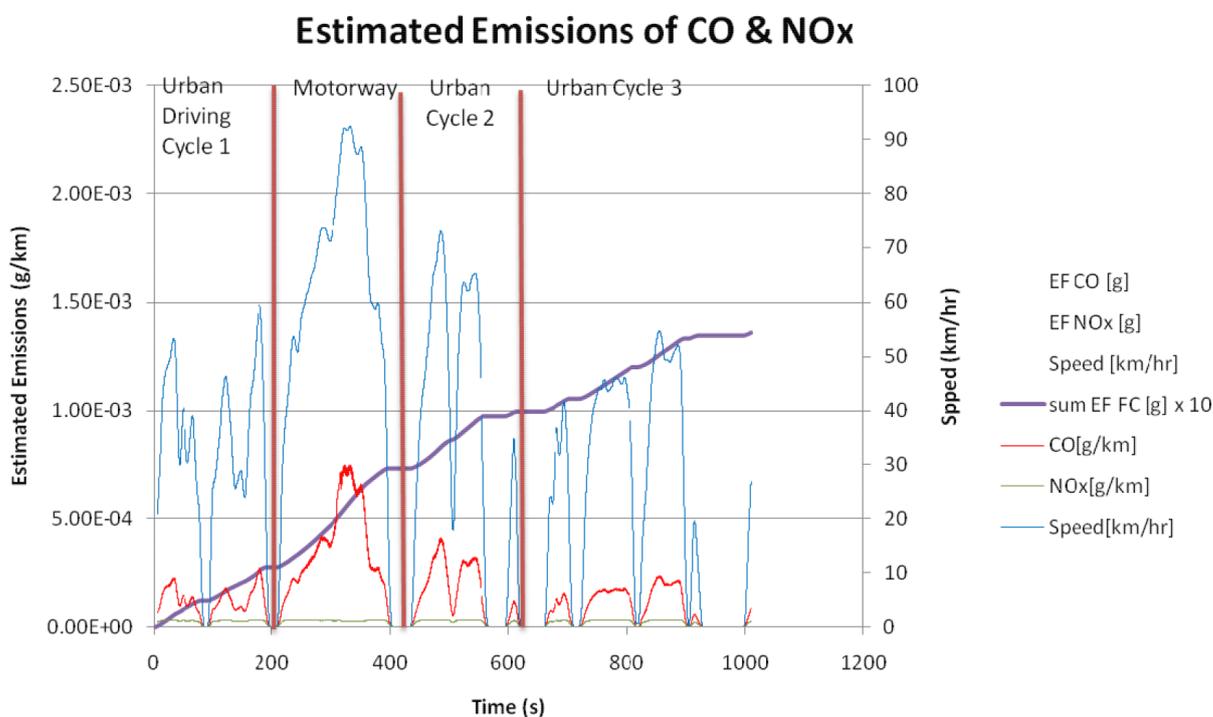


Рисунок 36 – Диаграмма предполагаемых эмиссий в соответствии с изменением скорости

На рисунке 36 представлено сравнение зон автострад и городских территорий с целью анализа теоретических выбросов загрязняющих веществ. Автострады демонстрируют средние показатели выбросов углекислого газа и оксидов азота на уровне 0,000347 и 0,0000265 грамма соответственно. В этом контексте применимо и уравнение для оценки эмиссии горячих газов, способствующее точности расчётов CO и NO<sub>x</sub>. Сравнивая с данными по городскому маршруту, можно заметить, что концентрация углекислого газа там достигает 0,00085 грамма, тогда как оксиды азота - 0,0000184 грамма. Основной вывод заключается в том, что движение на автострадах, где обычно поддерживается высокая скорость, в теории способствует снижению объёма выбросов в атмосферу по сравнению с аналогичным городским маршрутом. Это подкрепляет гипотезу о том, что равномерное движение менее вредно для экологии. Отличительная особенность городских дорог — множественные

остановки и старты, что ведёт к повышенному потреблению топлива и, как следствие, к возрастанию уровня эмиссии загрязнителей по сравнению с автострадами.

## 4.2 Сравнение результатов

### 4.2.1 Тестирование улично-дорожной сети и скоростных трасс

В данном эксперименте анализировались долгосрочные паттерны передвижения по городским маршрутам и скоростным трассам [84]. Рисунки 37 и 38 демонстрируют траектории движения, выявленные в ходе обоих видов транспортных перемещений.

Проезд через центральные городские районы в рамках цикла городского движения UDC характеризовался частыми остановками, при этом скорость транспортного средства поднималась до 74 км/ч. В то время как движение по скоростной дороге, описываемое циклом субурбанных поездок EUDC, отличалось минимальным количеством остановок, при этом разгоняясь до 100 км/ч неоднократно.

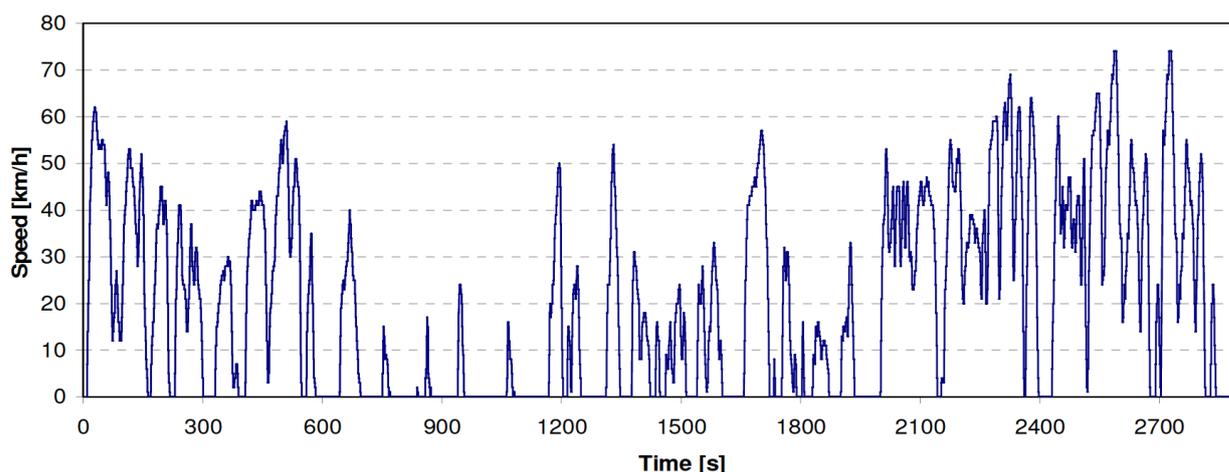


Рисунок 37 – Городской цикл движения

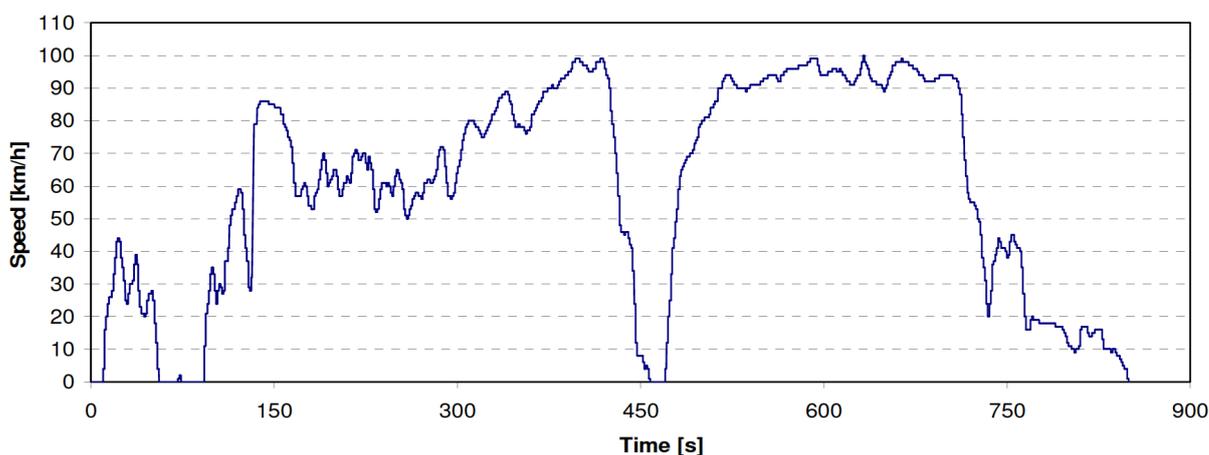


Рисунок 38 – Цикл движения за пределами города

После оптимизации траекторий движения двух маршрутов, выбросы углекислого газа и оксидов азота, а также суммарное потребление топлива (FC) количественно определяются в граммах на километр. Данные показатели вычисляются согласно формуле (12), применяя специфические коэффициенты для данного модели автомобиля.

Данные коэффициенты выбросов разработаны, опираясь на параметры, установленные в рамках методологии COPERT. Эти параметры представляют собой общепринятые показатели в Европе для определения экологических характеристик автомобиля, учитывая его модель, год выпуска, объем двигателя, а также соответствие законодательным экологическим нормам.

На рисунках 39 и 40 демонстрируются эмиссии углерода (CO) и оксидов азота (NO<sub>x</sub>) с учетом суммарного потребления топлива (FC) в граммах на километр для каждого из режимов движения.

Выявлено, что уровни выбросов оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и углеводородов (FC) оказались ниже в ходе испытаний в рамках европейского дополнительного унифицированного ездового цикла (EUDC), по сравнению с выбросами в городском цикле (UDC). В то же время, концентрация оксида углерода (CO) превышала значения, зафиксированные в EUDC, по сравнению с UDC. Сравнение UDC и EUDC по CO, NO<sub>x</sub> и FC приведено в таблице 6.

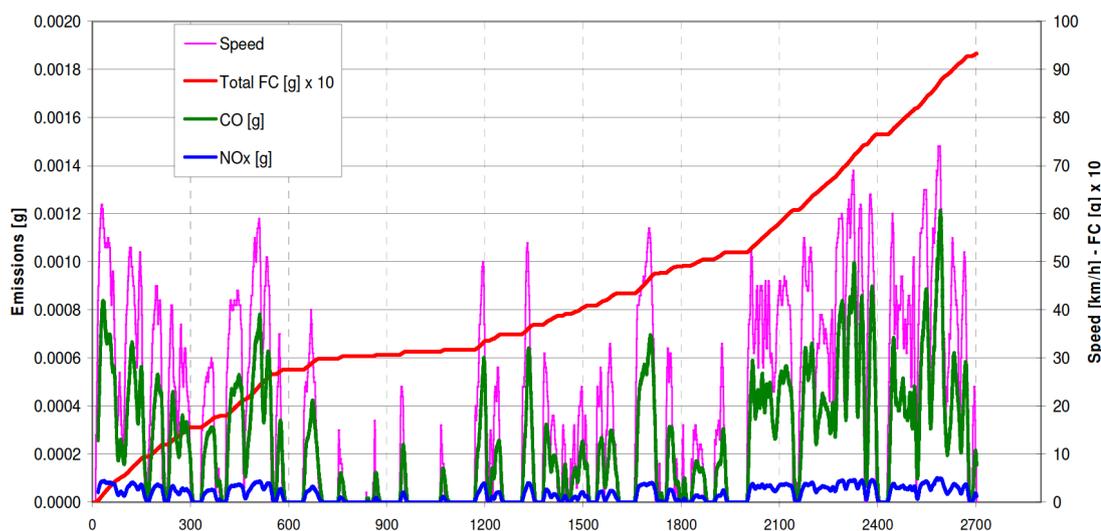


Рисунок 39 – Выбросы при городском цикле движения

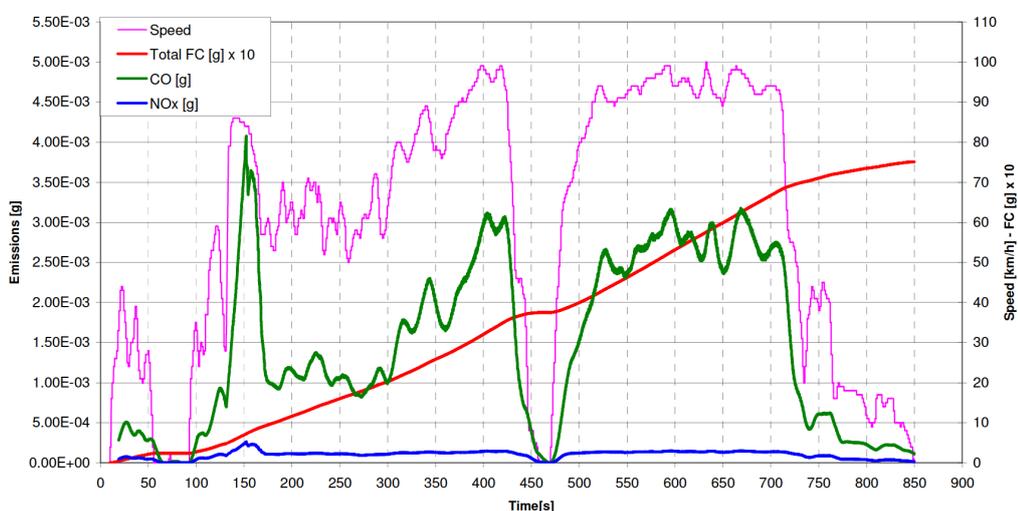


Рисунок 40 – Дополнительные выбросы при городском цикле вождения

Таблица 6 – Сравнение UDC и EUDC по CO, NOx и FC

Показатели	Городской цикл езды Пройденное расстояние = 14,678 км Средняя скорость = 19,547 км/ч. Время = 2703,3 секунды.			Загородный цикл езды Пройденное расстояние = 14,073 км Средняя скорость = 59,614 км/ч. Время = 849,9 секунды		
	CO	NOx	расход топлива	CO	NOx	расход топлива
Средние выбросы в секунду [г/с]	0,003	0,0004	0,345	0,014	0,0010	0,884
Средние выбросы на единицу расстояния [г/км]	0,544	0,076	63,59	0,837	0,059	53,38
Общие выбросы [г/поездку]	7,990	1,112	933,3	11,776	0,826	751,2

#### 4.2.2 Определение коэффициентов выбросов

Концентрации CO и NOx были вычислены отдельно в соответствии с каждым временным интервалом, применяя формулу (11), после чего их значения агрегировались для определения среднего эмиссионного фактора (EF) согласно уравнению (13).

$$EF_{\text{сред}} = \sum \frac{EF(n)}{N} \quad (13)$$

где  $EF_{\text{сред}}$  – средний эмиссионный фактор;

$EF(n)$  – эмиссия n-го токсичного компонента.

Для получения верифицируемых данных потребовалось выполнить 18 испытаний, целью которых было разработать типовой ездовой профиль для города Тольятти. Это позволило бы точно оценить эмиссии вредных веществ от автомобилей на основе местного ездового цикла в отличие от стандартного европейского ездового цикла (EDC) (таблица 7).

Таблица 7 – Среднее время испытательного маршрута

Время	8:00 - 10:00 ч	16:00 - 18:00 ч	21:00 - 22:00 ч
Маршрут 1 [min] среднее	33,9	20,77	10,68
Маршрут 1 [min] среднее	13,65	33,45	12,92

На рисунках 41 и 42 представлены результаты расчетов эмиссионных коэффициентов, выполненные на основе данных о режиме движения в городе Тольятти. Для этих расчетов использовались специализированные уравнение (12) и формула (13), применяемые в программном обеспечении COPERT4, и адаптированные под специфику каждого типа загрязняющих веществ. Исследование предполагало анализ только тех выбросов, что происходят при уже прогревом двигателя, т.е. через 15 минут после его запуска, что позволило исключить влияние так называемых холодных выбросов на итоговые показатели.

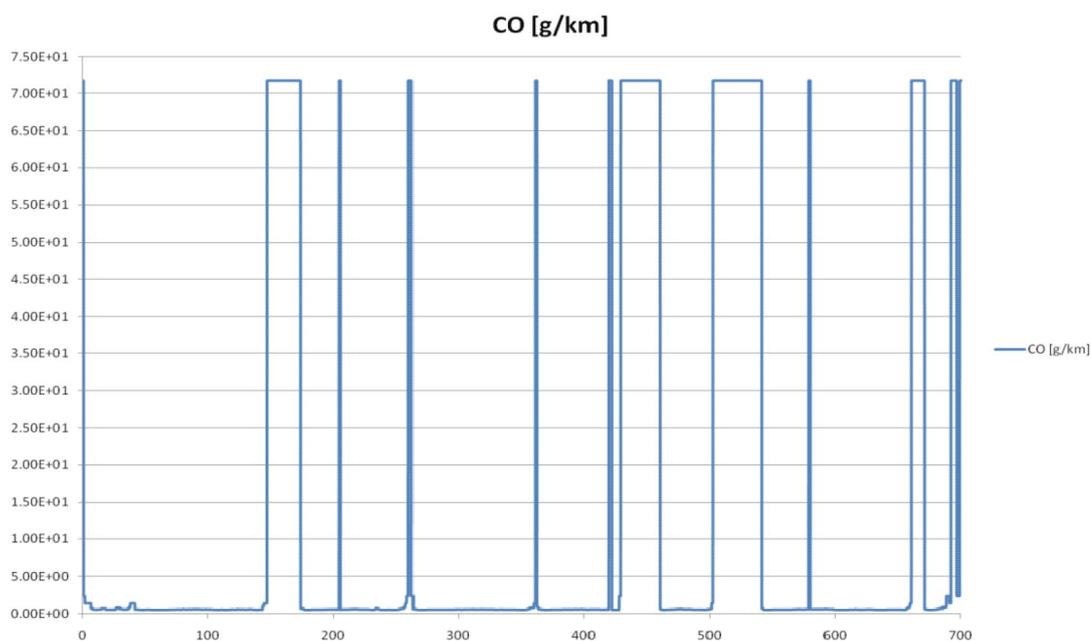


Рисунок 41 – Объемы эмиссии монооксида углерода, рассчитанные на основе анализа данных дорожного движения в Тольятти

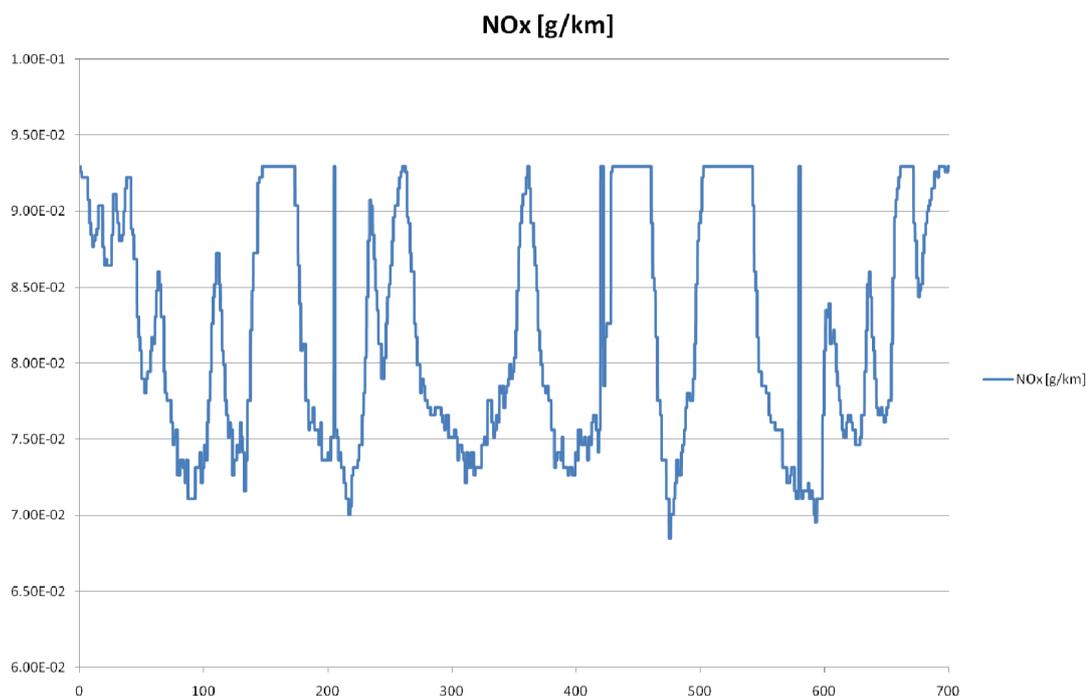


Рисунок 42 – Выбросы оксидов азота (NO), подсчитанные на основе анализа данных цикла движения в городе Тольятти

В автомобиле установлен анализатор газов с индивидуальным компактным дисплеем, задача которого - мониторинг и фиксация показаний, автоматически записывая их в документ формата Excel каждую секунду. Этот прибор способен сохранять записи в течение максимального времени в 20

минут. За достижения этого временного порога происходит автоматическая перезагрузка для начала регистрации нового цикла данных. В связи с ограничением по времени, для достоверности результатов, рекомендовалось выполнение кратковременного тест-драйва, не превышающего 20 минут.

Аналитический прибор для измерения газов определяет уровни выбросов используя две методики: в пересчете на объемные проценты и части на миллион, или же концентрацию в граммах на мили. В рисунках 43 и 44 представлены данные об эмиссиях, пересчитанные в граммы на каждый пройденный километр.

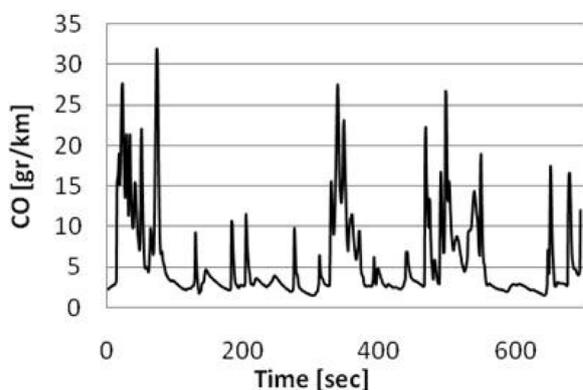


Рисунок 43 – Эмиссии угарного газа, зафиксированные газоанализирующим устройством

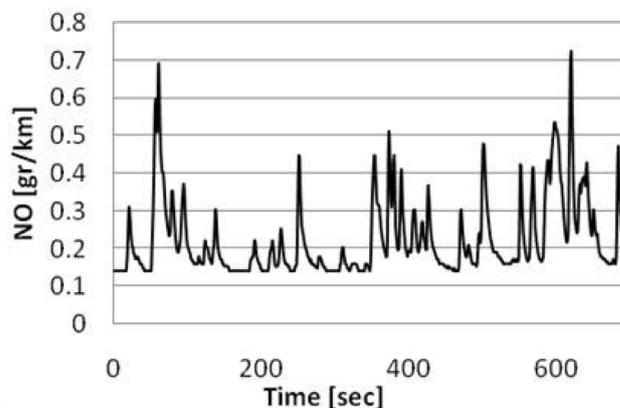


Рисунок 44 – Эмиссии оксидов азота (NO) из газоанализатора

Для определения общего показателя выбросов углекислого газа (CO) и оксидов азота (NO) с использованием метода расчетов была вычислена средняя скорость движения автомобиля в километрах в час и применена в рамках уравнения (10), что позволило оценить средние показатели выбросов в граммах на километр для каждого из изучаемых газов. Полученные значения были далее умножены на общее преодоленное расстояние за время поездки в километрах. В отличие от расчетного, метод измерения предполагает прямое умножение фиксированных величин выбросов для каждого газа на общую длину маршрута.

Таблица 8 демонстрирует аналитическое сопоставление двух различных методологий. Результаты, выявленные в рамках проведенного эксперимента,

выявили значительные расхождения между теоретически предсказанными показателями выбросов углекислого газа (CO) и окислов азота (NO) согласно COPERT 4 и их реальными уровнями. Выяснилось, что теоретическая прогнозируемая концентрация CO была превышена, в то время как показатель NO оказался недооцененным.

Таблица 8 – Анализ сопоставления фактических и теоретических объемов эмиссий

Токсичны элемент	Измеренные выбросы	Расчетные выбросы
NO <sub>x</sub> [гр/км]	1,136	0,420
CO [гр/км]	28,66	66,48

Для анализа различий в эмиссии оксида углерода и оксидов азота, были разработаны диаграммы, отражающие два показателя эмиссии в корреляции со скоростью автомобилей [85]. Рисунки 45 и 46 демонстрируют вариации коэффициентов выбросов при увеличении скорости авто от стационарного положения до 100 км/ч.

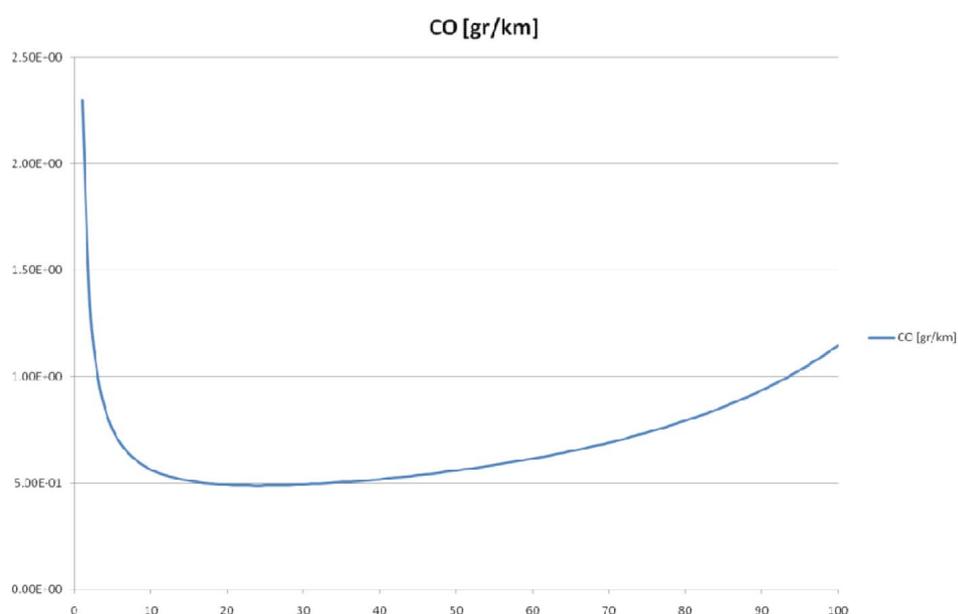


Рисунок 45 – Корреляция между выделением углекислого газа и темпом движения по протоколу COPERT.

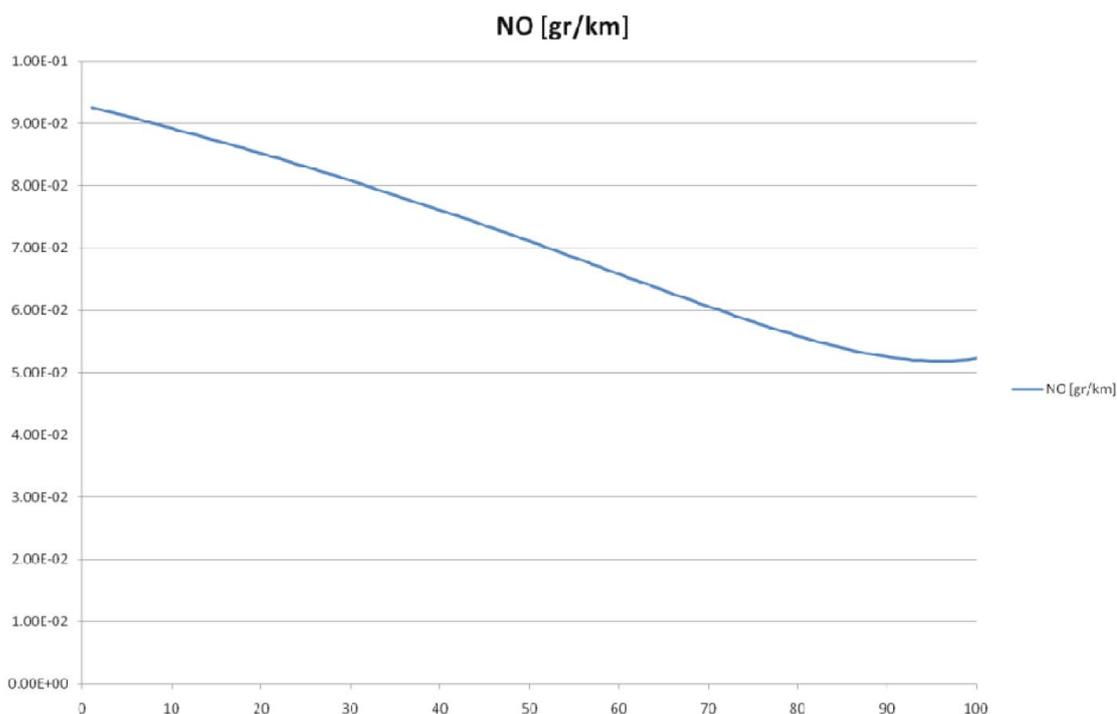


Рисунок 46 – Корреляция эмиссии NO<sub>x</sub> с величиной скорости по системе оценки COPERT

Выявлено, что угарный газ (CO) выделяется в значительных объемах во время остановки автомобиля (при состоянии холостого хода), что составляло до 17% от общей продолжительности тестирования. Это обусловило заметную разницу в фактическом уровне эмиссий. В контексте выбросов оксидов азота (NO<sub>x</sub>), их колебания были различны в зависимости от уровня скорости, включая периоды неподвижности авто.

В Таблице 9 демонстрируются предельные значения скоростей авто, при которых меняется концентрация угарного газа и оксидов азота. Отметим, что исключение периодов холостого хода из общего времени приведет к занижению оценок эмиссии угарного газа.

Таблица 9 – Критические скорости автомобиля для изменений CO и NO<sub>x</sub>

Скорость движения [км/ч]	0	1	25	96	100
CO [гр/км]	71,7	2,3	0,49	-	1,15
NO <sub>x</sub> [гр/км]	0,0929	0,0926	-	0,0518	0,0523

### 4.3 Подведение итогов исследования

### 4.3.1 Определение начального цикла вождения

Три идеальных маршрута были отобраны для пиковых времен, согласно рисунку 47. На рисунке 48 представлены три оптимальных варианта маршрутов для вечерних поездок. Был проведен достаточный объем испытаний для того, чтобы итоговый цикл движения мог отражать типичные условия передвижения по городу.

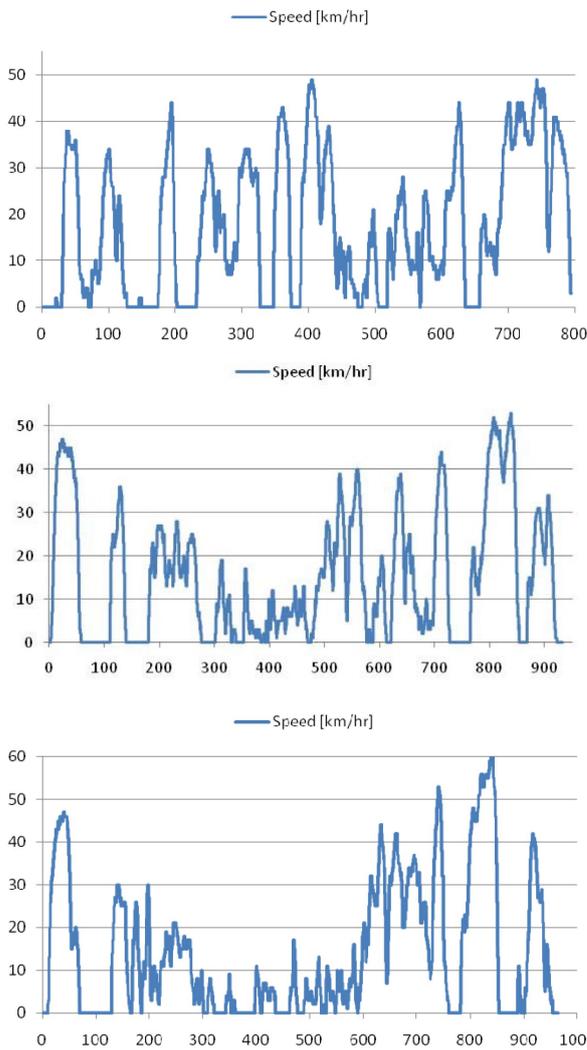


Рисунок 47 – Три оптимальные поездки в час пик [время в зависимости от скорости].

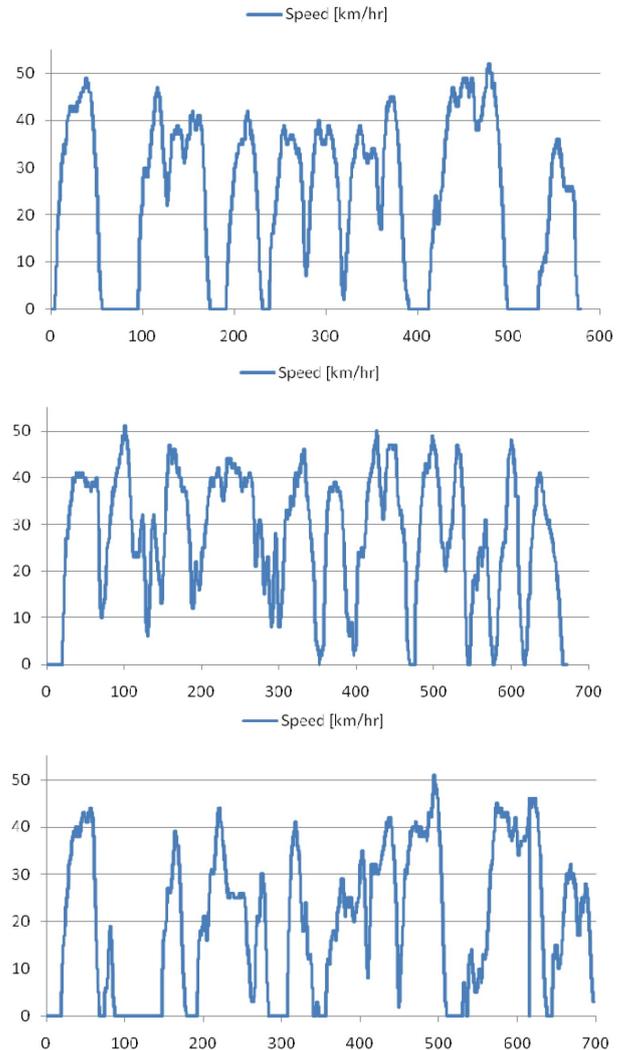


Рисунок 48 – Три оптимальные поездки в вечернее время [время в зависимости от скорости].

Выявлено, что пиковая скорость достигает 55 км/ч, при этом количество остановок ограничивается 15 на протяжении одного маршрута. Выбор

маршрута обусловлен двумя основными факторами: текущей загруженностью трафика и расстоянием до центральной части города, как упоминается в источнике [79].

#### 4.3.2 Анализ потребления энергии во время движения

Рисунки 49 и 50 демонстрируют профили движения транспортных средств, зафиксированные в условиях пиковой нагрузки и во времена сниженного трафика. В периоды пиковой активности наблюдалось значительное количество изменений скорости, вызванных частыми стартами и остановками, в результате чего средняя скорость составила 28,72 километра в час. В контрасте с этим, вечерние поездки показали более высокую среднюю скорость – 32,22 км/ч, что свидетельствует о меньшем количестве задержек и более свободном потоке трафика. Однако наличие светофоров и общая плотность дорожного движения вносили некоторую степень неравномерности в движение транспортных средств в обоих случаях исследования.

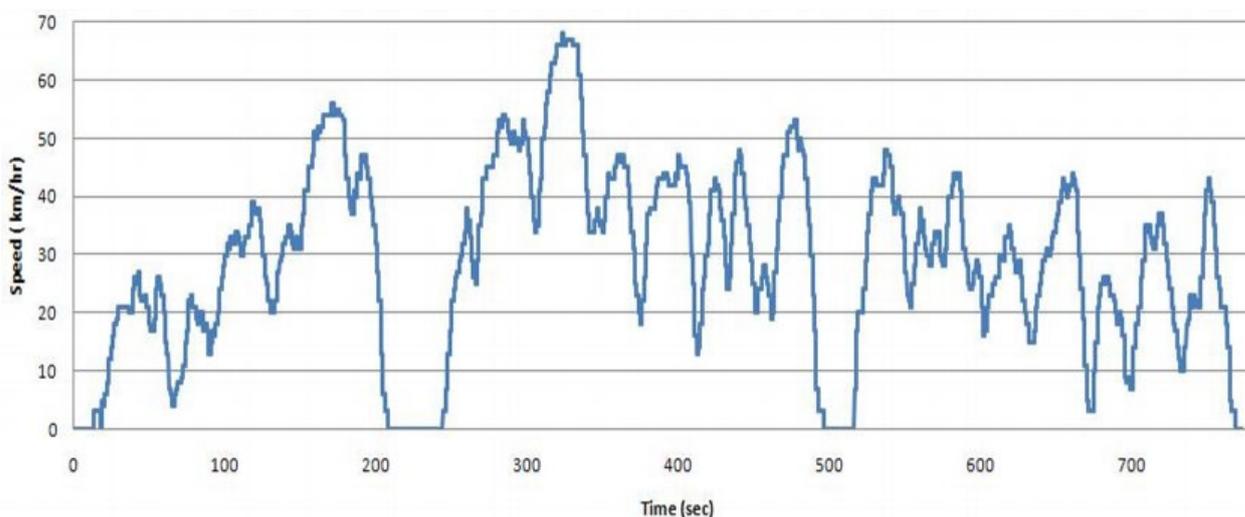


Рисунок 49 – Фаза 2 цикла движения в период повышенной загруженности дорог

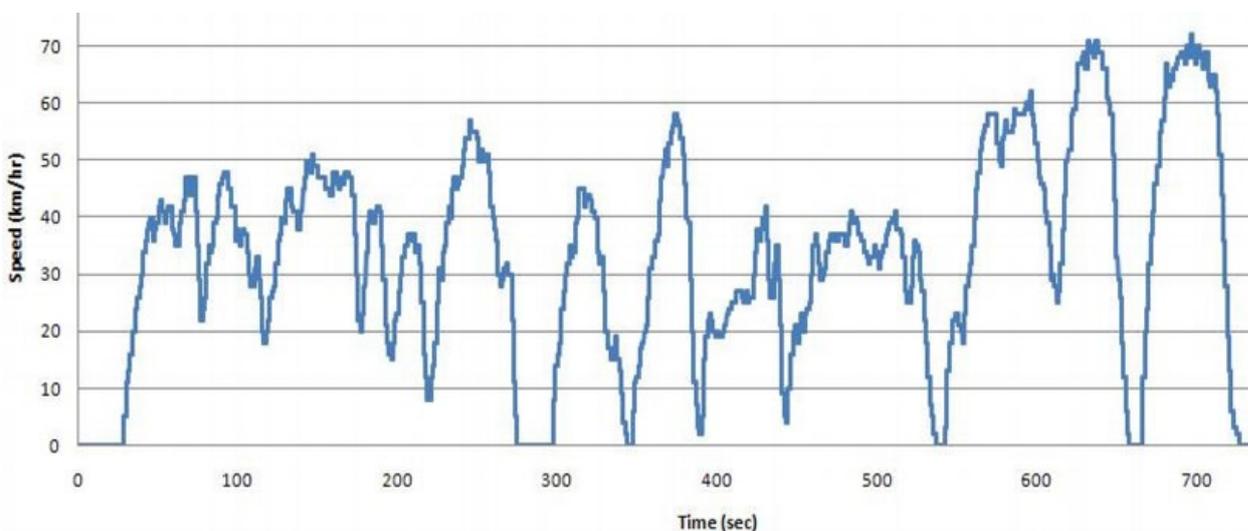


Рисунок 50 – Этап второй: управление автомобилем в условиях вечерней езды

На иллюстрации номер 51 представлен процесс движения транспортного средства по городу Алеппо в условиях интенсивного трафика, включая данные о выбросах углекислого газа ( $\text{CO}$ ) и оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) в граммах в секунду, а также потреблении топлива ( $\text{FC}$ ) в граммах. Данные были определены на основе формулы (3), принимая во внимание специфические коэффициенты для данного легкового автомобиля. Эти коэффициенты определяются с учетом характеристик эмиссии при нагреве по методике COPERT, которая представляет собой стандартизированный подход Европейского Союза для классификации автомобилей по марке, году выпуска, объему двигателя и соответствии законодательным нормам по экологической безопасности.

В таблице 10 представлены усреднённые показатели выбросов за поездку, рассчитанные по формуле COPERT исходя из средней скорости.

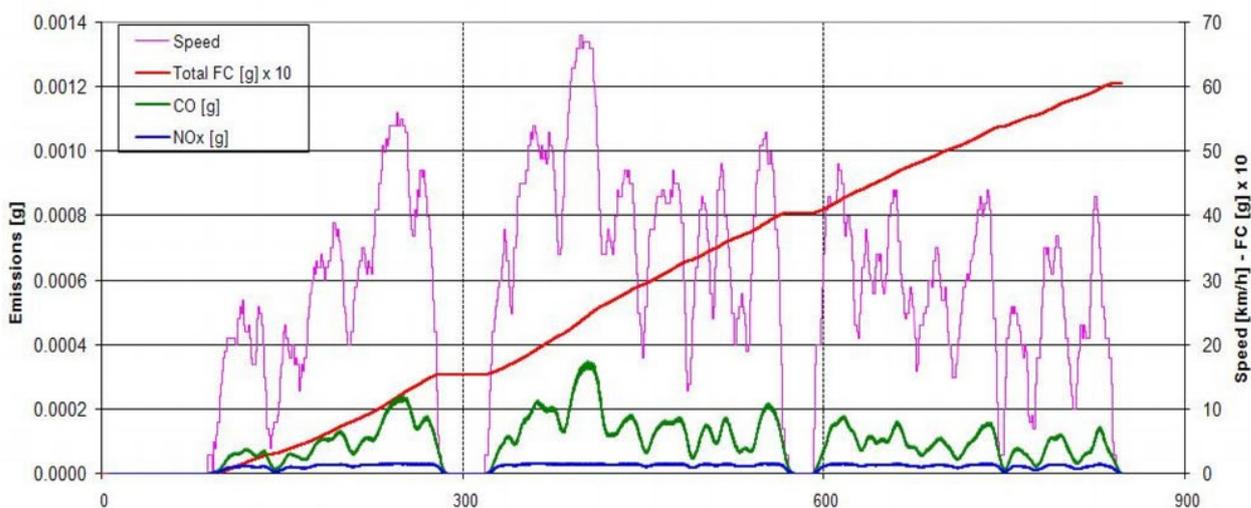


Рисунок 51 – Три оптимальные поездки в вечернее время [время в зависимости от скорости]

Таблица 10 – Средняя скорость, выбросы CO, NO<sub>x</sub> и FC

Исследуемый параметр	Скорость [км/ч]	CO [г/км]	NO <sub>x</sub> [г/км]	FC [г/км]
Усредненный результат	28,27	0,1743	0,0499	104,6885

Таблица 11 демонстрирует совокупные показатели эмиссии на поездку, рассчитанные путем суммирования индивидуальных коэффициентов выбросов, измеряемых за каждую секунду.

Таблица 11 – Общие выбросы, полученные за поездку

Исследуемый параметр	CO [г]	NO <sub>x</sub> [г]	FC [г]	Time [с]	Дистанция [км]
Общий выброс	1.201	0.268	606.651	848.28	6.175

#### Выводы по главе 4

Поведение вождения различается в зависимости от города, особенно учитывая экономическую специализацию региона. Чтобы адекватно анализировать уровень загрязнения окружающей среды, вызванного автомобильными выбросами, требуются индивидуализированные исследования для каждого места. Такие данные позволяют оценить реалистичную картину влияния транспорта на качество воздуха, что, в свою очередь, поможет местным органам власти разработать эффективные стратегии контроля за уровнем загрязнения.

## Заключение

Регулирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, особенно происходящих от автомобильного транспорта, стоит в ряду ключевых задач, связанных с ростом числа автомобилей. В этой связи актуальной становится разработка эффективных и оперативных методик для оценки уровня выбросов от автотранспорта. В рамках реализации этой задачи были применены разнообразные подходы, включая мониторинг выбросов на основе анализа реальных дорожных условий, а также применение специализированного и теоретического ПО COPERT 4 для моделирования.

Поведение вождения различается в зависимости от города, особенно учитывая экономическую специализацию региона (например, промышленность или аграрный сектор). Чтобы адекватно анализировать уровень загрязнения окружающей среды, вызванного автомобильными выбросами, требуются индивидуализированные исследования для каждого места. Такие данные позволяют оценить реалистичную картину влияния транспорта на качество воздуха, что, в свою очередь, поможет местным органам власти разработать эффективные стратегии контроля за уровнем загрязнения.

### Выводы по первой главе

Выполненный обзор литературы показал перспективы применения современных технологических решений для снижения токсичности современных атмосферных автомобильных двигателей. Показано что на выбросы токсичных компонентов влияет множество факторов и без применения гибких систем искусственного интеллекта невозможно учесть их все для получения минимальных значений по токсичности.

### Выводы по главе 2

Выполненное исследование демонстрирует, что для точного анализа горения важно использовать как общие подходы, такие как измерение давления с помощью датчиков, так и целенаправленные методы, позволяющие

изучить, как состав топливно-воздушной смеси влияет на скорость и механизм химических реакций сгорания.

#### Выводы по главе 3

Выполнено моделирование в программе LabVIEW позволяющее проводить запись и первичный анализ экспериментальных данных. Показана достоверность разрабатываемых моделей.

#### Выводы по главе 4

Поведение вождения различается в зависимости от города, особенно учитывая экономическую специализацию региона. Чтобы адекватно анализировать уровень загрязнения окружающей среды, вызванного автомобильными выбросами, требуются индивидуализированные исследования для каждого места. Такие данные позволяют оценить реалистичную картину влияния транспорта на качество воздуха, что, в свою очередь, поможет местным органам власти разработать эффективные стратегии контроля за уровнем загрязнения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abdel- Rahman, A.A., On the emissions from internal combustion engines: A review. *International Journal of Energy Research* volume 22 (1998), 483-513
2. Arteconi, A., et al., (2010), «Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe», *Appl. Energy*, Vol.87 (6), pp. 2005-2013.
3. Baltusis, P. 2004; On-board vehicle diagnostics. *Convergence Transportation Electronics Association*, Paper 2004-21-0009
4. Barone, Stefano. *Statistics-Driven Development of OBD Systems; An Overview*, *Quality and Reliability Engineering International*, 2006, vol 22, 615-628
5. Bishop, G.A. and Stedman, D.H. 1996; Measuring the emissions of passing cars. *Accounts of chemical research*, Volume 29, Number 10: pp 489-495.
6. Bishop, G.A., Stedman, D.H., De La Garza Castro, J., and Davalos, F.J. 1997; On-road remote sensing of vehicle emissions in Mexico; *Environmental Science and Technology* 31: pp 3505–3510.
7. Bradley, K.S., Brooks, K.B., Hubbard, L.K., Popp, P.J. and Stedman, D.H. 2000; Motor-vehicle fleet emissions by OP-FTIR. *Environmental Science and Technology* 34: pp 897-899.
8. Brian Vad Mathiesen, Henrik Lund, Kenneth Karlsson, 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth, *Applied Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online 31 March 2010, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.03.001.
- a. Delorme, A. Rousseau, P. Sharer, S. Pagerit, and T. Wallner, “Evolution of hydrogen fueled vehicles compared to conventional vehicles from 2010 to 2045,” 2009.
9. Khandelwal, A. Karakurt, P. R. Sekaran, V. Sethi, and R. Singh, “Hydrogen powered aircraft : The future of air transport,” *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 60, pp. 45–59, 2013.

10. L. Salvi and K. A. Subramanian, “Experimental investigation on effects of compression ratio and exhaust gas recirculation on backfire, performance and emission characteristics in a hydrogen fuelled spark ignition engine,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 13, pp. 5842–5855, 2016.
11. White, R. R. Steeper, and A. E. Lutz, “The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 10, pp. 1292–1305, 2006.
12. B. Lewis and G. Von Elbe, *Combustion, flames, and explosions of gases*. New York: Academic Press, 2d ed. ed., 1961.
13. Council directive of 20 March 1970 on the approximation of the laws of the Member States on measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles (2004), European Union.
14. K. Srivastava, A. K. Agarwal, A. Datta, and R. K. Maurya, *Advances in internal combustion engine research*. Singapore: Springer, 2017.
15. D. Kabat and J. Heffel, “Durability implications of neat hydrogen under sonic flow conditions on pulse-width modulated injectors,” *International Journal of Hydrogen Energy - INT J HYDROGEN ENERG*, vol. 27, pp. 1093– 1102, 2002.
16. D. R. Pearl, “O-ring seals in the design of hydraulic mechanisms,” *SAE Technical Paper*, vol. 470247, p. 10, 1947.
17. Directive 98/69/EC of The European Parliament and of the council of 13 October 1998, Relating to measures to be taken against pollution by emission from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC
18. Peeters, “Literature Study: The Challenges of a Hydrogen Internal Combustion Engine ,” Master’s thesis, Delft University of Technology, 2021.
19. Zhao, T. N. Asmus, D. N. Assanis, J. E. Dec, J. A. Eng, and P. M. Najt, “Homogeneous charge compression ignition (hcci) engines,” 2003.
20. Fuller, G., 2006; London Air Quality 2004; London Air Quality Network Report 12; Environmental Research Group, London, UK.

21. L. Yip, A. Srna, A. C. Y. Yuen, S. Kook, R. A. Taylor, G. H. Yeoh, P. R. Medwell, and Q. N. Chan, "A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 22, p. 4842, 2019.
22. Li and G. A. Karim, "Knock in spark ignition hydrogen engines," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, no. 8, pp. 859–865, 2004.
23. H. Osamura and N. Abe, *Development of New Iridium Alloy for Spark Plug Electrodes*, vol. 108. 1999.
24. Hao Cai, Shaodong Xie, "Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005", *Atmospheric Environment*, Volume 41, Issue 39, December 2007, Pages 8963-8979
25. Harrison, R.M., Tilling, R., Callen Romero, M.S., Harrad, S. and Jarvis, K. 2003; A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmospheric Environment* 37 (17): pp 2391-2402.
26. Hausberger, S; Rodler, J; Sturm, P; and Rexeis, M. 2003. Emission factors for heavy duty vehicles and validation by tunnel measurements. *Atmospheric Environment* 37: pp5237-5245.
27. Haydar, F. and Padiaditi, K. 2010. Evaluation of the environmental impact assessment system in Syria. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(6), pp.363-370.
28. Heywood, John B., *Internal combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill International Editions -1988
29. Topinka, M. D. Gerty, J. Heywood, and J. Keck, "Knock behavior of a lean-burn, h<sub>2</sub> and co enhanced, si gasoline engine concept," *SAE Technical Papers*, 2004.
30. W. Heffel, "Nox emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500rpm using exhaust gas recirculation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 8, pp. 901–908, 2003.

31. J. W. Heffel, "Nox emission reduction in a hydrogen fueled internal combustion engine at 3000 rpm using exhaust gas recirculation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 11, pp. 1285–1292, 2003.
32. J. Wang, Z. Huang, Y. Fang, B. Liu, K. Zeng, H. Miao, and D. Jiang, "Combustion behaviors of a direct-injection engine operating on various fractions of natural gas–hydrogen blends," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 3555–3564, 2007.
33. Jimenez, J.L., Koplow, M.D., Nelson, D.D., Zahniser, M.S. and Schmidt, S.E. 1999; Characterisation of on-road vehicle NO emissions by a TILDAS sensor. *Journal of the Air and Waste Management Association* 49: pp463-470
34. Alvine, V. Shutthanandan, W. Bennett, C. Bonham, D. Skorski, S. Pitman, M. Dahl, and C. Henager, "High- pressure hydrogen materials compatibility of piezoelectric films," *Applied Physics Letters*, vol. 97, pp. 221911– 221911, 2010.
35. K. Yamane, M. Nogami, Y. Umemura, M. Oikawa, Y. Sato, and Y. Goto, "Development of high pressure h<sub>2</sub> gas injectors, capable of injection at large injection rate and high response using a common-rail type actuating system for a 4-cylinder, 4.7-liter total displacement, spark ignition hydrogen engine," *SAE Technical Papers*, 2011.
36. Das, "Fuel induction techniques for a hydrogen operated engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 15, pp. 833–842, 1990.
37. L. Hosking, "Literature Study: A Flying Test Bed for Sustainable Aviation: Alternative Fuel-powered Aircraft ," Master's thesis, Delft University of Technology, 2020.
38. L. M. Das, "Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 27, no. 5, pp. 479–487, 2002.
39. Lindfeldt, E.G., et al., (2010), «Strategies for a road transport system based on renewable resources – The case of an import-independent Sweden in 2025», *Appl. Energy*, Vol.87 (6), pp. 1836-1845.

40. Ludykar et al., Cold start emissions at + 22, -7 and -20 C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, the Science of the Total Environment 235 (1999) 65-69
41. Ludykar et al., Cold start emissions at + 22, -7 and -20 C ambient temperatures from a three-way catalyst (TWC) car: regulated and unregulated exhaust components, the Science of the Total Environment 235 (1999) 65-69
42. R. Sadiq Al-Baghdadi, "Effect of compression ratio, equivalence ratio and engine speed on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel," Renewable Energy, vol. 29, no. 15, pp. 2245–2260, 2004.
43. M. Berckmuller and H. Rottengruber, "Potentials of a charged si-hydrogen engine," Proceedings of the International Hydrogen Energy Forum; 2004 May 25-28; Beijing, China, pp. 59–67, 2004.
44. M. Christensen and B. Johansson, "Influence of mixture quality on homogeneous charge compression ignition," SAE transactions, pp. 951–963, 1998.
45. M. Christensen, B. Johansson, and P. Einewall, "Homogeneous charge compression ignition (hcci) using isooctane, ethanol and natural gas-a comparison with spark ignition operation," SAE transactions, pp. 1104– 1114, 1997.
46. McGahan, Paul., PM, Estimation of On-Road Vehicle Fuel Consumption and Emissions using Analysis of OBD Signals, 4th Year Mechanical Engineering Project, BEng, 07/04/2006.
47. Moosmuller, H., Mazzoleni, C., Barber, P.W., Kuhns, H.D., Keislar, R.E. and Watson, J.G. 2003; On-road measurement of automotive particulate emissions by ultraviolet lidar and transmissometer: Instrument. Environmental Science and Technology 37: pp4971-4978.
48. Myung et al. Experimental investigation of the effect of thin- wall substrates and spark timing on total hydrocarbon emissions during cold-start for super-

- ultra low-emission application, *Journal of Automobile Engineering*, Vol 218, Part D (2004)
49. Ou, X., Yan, X., Zhang, X. and Liu, Z. 2012. Life-cycle analysis on energy consumption and GHG emission intensities of alternative vehicle fuels in China. *Applied Energy*, 90(1), pp.218-224.
  50. G. Aleiferis and M. F. Rosati, "Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine," *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 7, pp. 2500–2515, 2012.
  51. Huyskens, S. Oost, P. J. Goemaere, K. Bertels, and M. Pecqueur, "The technical implementation of a retrofit hydrogen pfi system on a passenger car," *SAE Technical Papers*, 2011.
  52. M. Najt and D. E. Foster, "Compression-ignited homogeneous charge combustion," *SAE Transactions*, pp. 964– 979, 1983.
  53. P. Talebizadeh Sardari, M. Babaie, R. Brown, H. Rahimzadeh, Z. Ristovski, and M. Arai, "The role of non-thermal plasma technique in nox treatment: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 886–901, 2014.
  54. Pang et al., Review of engine cooling technologies for modern engines. *Journal of automotive engineering*, Vol 218, Part D (2004)
  55. Pierson et al. C, Comparison of the SCAQS tunnel study with other on-road emissions data. *Journal of Air Waste Management Association* 40, 1495-1504
  56. Pokharel, S.S., Bishop, G.A. and Stedman, D.H. 2002; An on-ro ad motor vehicle emissions inventory for Denver: An efficient alternative to modeling. *Atmospheric Environment* 36: pp5177–5184.
  57. H. Stanglmaier and C. E. Roberts, "Homogeneous charge compression ignition (hcci): Benefits, compromises, and future engine applications," *SAE Transactions*, vol. 108, pp. 2138–2145, 1999.
  58. Hari Ganesh, V. Subramanian, V. Balasubramanian, J. M. Mallikarjuna, A. Ramesh, and R. P. Sharma, "Hy- drogen fueled spark ignition engine with

- electronically controlled manifold injection: An experimental study,” *Renewable Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1324–1333, 2008.
59. R. J. Natkin, A. R. Denlinger, M. Younkins, A. Z. Weimer, S. Hashemi, and A. T. Vaught, “Ford 6.8l hydrogen ic engine for the e-450 shuttle van,” *SAE Technical Papers*, 2007.
  60. R.J. North “Assessment of real-world pollutant emissions from a light duty diesel vehicle”. PhD Thesis, University of London, 2006.
  61. Rabl, A. and de Nazelle, A., (2012), «Benefits of shift from car to active transport», *Transp.Policy*, Vol.19 (1), pp. 121-131.
  62. Verhelst and T. Wallner, “Hydrogen-fueled internal combustion engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 6, pp. 490–527, 2009.
  63. Verhelst S., Sierens, and S. Verstraeten, “A critical review of experimental research on hydrogen fueled si engines,” *SAE Technical Papers*, 2006.
  64. Saerens, J. Vandersteen, T. Persoons, J. Swevers, M. Diehl, E. Van den Bulck, Minimization of the fuel consumption of a gasoline engine using dynamic optimization, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 9, September 2009, Pages 1582- 1588, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.022.
  65. Sharad, G. (2012), «Impacts of traffic-flows on vehicular-exhaust emissions at traffic junctions», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.17 (1), pp. 21-27.
  66. Shi, J.P., Harrison, R.M., Evans, D.E., Alam, A., Barnes, C. and Carter, G. 2002; A method for measuring particle number emissions from vehicles driving on the road. *Environmental Technology*, Volume 23, Number 1: pp 1-14
  67. Smit, R., et al., (2010), «Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis», *Atmos.Environ*, Vol.44 (25), pp. 2943-2953.
  68. Stephens, R.D., Giles, M., McAlinden, K., Gorse, R.A., Hoffman, D. and James, R. 1997; An analysis of Michigan and California CO remote sensing measurements. *Journal of the Air and Waste Management Association* 47: pp 601-607.

69. Sturm et al. Determination of Traffic emissions – intercomparison of different calculation methods, *the science of the total environment*, 189/190 (1996) 187-196
70. Su, J., et al., (2011), «Non-methane volatile organic compound emission inventories in Beijing during Olympic Games 2008», *Atmos. Environ.*, Vol.45 (39), pp. 7046-7052.
71. Ullman, “Investigation of the effects of fuel composition on heavy-duty diesel engine emissions,” SAE International, 1989.
72. Dhyani and K. A. Subramanian, “Fundamental characterization of backfire in a hydrogen fuelled spark ignition engine using cfd and experiments,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 60, pp. 32254–32270, 2019.
73. Frijters, “A Flying Test Bed for Sustainable Aviation - Hydrogen Propulsion” Master’s thesis, Delft University of Technology, 2020.
74. Pulkrabek, *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
75. W. Stockhausen, R. Natkin, D. Kabat, L. Reams, X. Tang, S. Hashemi, S. Szwabowski, and V. Zanardelli, “Ford p2000 hydrogen engine design and vehicle development program,” SAE Technical Papers, 2002.
76. Wang, H., et al., (2010), «Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005», *Environmental Pollution*, Vol.158 (2), pp. 394-400.
77. Wang, Q., H. Huo, K. He, Z. Yao and Q. Zhang, “Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13, 289-297, 2008.
78. Wenzel, T. 2003; Use of Remote Sensing measurements to evaluate vehicle emission monitoring programs: results from Phoenix, Arizona. *Environmental Science and Policy* Volume 6, Issue 2: pp 153-166.

79. Welch, D. Mumford, S. Munshi, J. Holbery, B. Boyer, M. Younkings, and H. Jung, Challenges in Developing Hydrogen Direct Injection Technology for Internal Combustion Engines. 2008.
80. Wenzel, T., Singer, B.C. and Slott, R., 2000; Some issues in the statistical analysis of vehicle emissions. *Journal of Transportation Statistics*, September 2000. pp 1-14.
81. Wielenmann et al., Regulated and unregulated diesel and cold start emissions at different temperatures, *Atmospheric Environment*, vol 39 (2005), 2433-2441)
82. Tang, D. M. Kabat, R. J. Natkin, W. F. Stockhausen, and J. Heffel, "Ford p2000 hydrogen engine dynamometer development," SAE Technical Papers, 2002.
83. Saboohi, H. Farzaneh, Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 10, October 2009, Pages 1925-1932, ISSN 0306-2619, DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.017.)
84. Younglove, T., Scora G. and Barth M. 2005; Designing on-road vehicle test programs for the development of effective vehicle emission models. *Transportation Research Record No. 1941*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp 51-59.
85. Huang, J. Wang, B. Liu, K. Zeng, J. Yu, and D. Jiang, "Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas-hydrogen blends under different ignition timings," *Fuel*, vol. 86, no. 3, pp. 381-387, 2007.