

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»  
Институт механизации и технического сервиса  
Кафедра «Эксплуатация и ремонт машин»

Направление подготовки –35.04.06 Агроинженерия  
Направленность (профиль) «Технический сервис в сельском хозяйстве»

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**на соискание квалификации «магистр»**  
**(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

Тема: «РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО  
УСТРОЙСТВА СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ  
ДИЗЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ»

Студент магистратуры \_\_\_\_\_  Ахтямов А.А.

Научный руководитель,  
д. т. н., доцент \_\_\_\_\_  Валиев А.Р.

Рецензент  
д. т. н., профессор \_\_\_\_\_  Нуруллин Э.Г.

Обсуждена на заседании кафедры и допущена к защите  
(Протокол № 8 от 04.02. 2022 г.)

Зав. кафедрой, д.т.н., профессор \_\_\_\_\_  Адигамов Н.Р.

Казань – 2022 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу

Выпускника Ахтямова Айнура Айратовича

Направление 35.04.06 Агроинженерия

Направленность Технический сервис в сельском хозяйстве

Тема ВКР «Разработка и исследование комбинированного устройства снижения токсичности отработавших газов дизелей, используемых в сельском хозяйстве»

Объем ВКР: текстовые документы содержат: 133 страниц, в т.ч. пояснительная записка 111 стр.; включает: таблиц 22, рисунков и графиков 35, фотографий 15 штук, список использованной литературы состоит из 74 наименований.

1. Актуальность темы, ее соответствие содержанию ВКР Тема актуальна и содержание работы соответствует ей.

2. Глубина, полнота и обоснованность решения поставленных задач Поставленные задачи решены полностью с достаточной глубиной и обоснованы

3. Качество оформления ВКР Соответствует требованиям

4. Положительные стороны ВКР (новизна разработки, применение информационных технологий, практическая значимость и т.д.)

Разработанные мероприятия и устройство по снижению токсичности отработавших газов дизелей могут быть использованы при эксплуатации, модернизации двигателей.

## 5. Компетентностная оценка ВКР

Компетенция	Оценка компетенции*
УК-1. Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий	<i>Хорошо</i>
УК-2. Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	<i>Хорошо</i>
УК-3. Способен организовывать и руководить работой команды, выработать командную стратегию для достижения поставленной цели	<i>Отлично</i>
УК-4. Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	<i>Отлично</i>
УК-5. Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	<i>Отлично</i>
УК-6. Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	<i>Отлично</i>
ОПК-1. Способен анализировать современные проблемы науки и производства, решать задачи развития области профессиональной деятельности и (или) организации	<i>Отлично</i>
ОПК-2. Способен передавать профессиональные знания с использованием современных педагогических методик	<i>Хорошо</i>
ОПК-3. Способен использовать знания методов решения задач при разработке новых технологий в профессиональной деятельности	<i>Отлично</i>
ОПК-4. Способен проводить научные исследования, анализировать результаты и готовить отчетные документы	<i>Хорошо</i>
ОПК-5. Способен осуществлять технико-экономическое обоснование проектов в профессиональной деятельности	<i>Отлично</i>
ОПК-6. Способен управлять коллективами и организовывать процессы производства	<i>Отлично</i>
ПК-1. Способен обеспечить эффективное использование, модернизацию и надежную работу сложных технических систем на предприятиях АПК	<i>Хорошо</i>
ПК-2. Способен выбрать и использовать технологии и технические средства технического обслуживания, хранения, ремонта машин и оборудования, восстановления и утилизации изношенных изделий	<i>Отлично</i>
ПК-3. Способен разрабатывать и применять мероприятия по повышению эффективности и качества технического сервиса в АПК	<i>Отлично</i>
ПК - 4. Способность проводить научные исследования при разработке новых технологии и технических средств технического обслуживания, хранения, ремонта и восстановления деталей сельскохозяйственной техники, машин и оборудования для производства, хранения и транспортирования продукции растениеводства и животноводства, а также технических средств перерабатывающих производств	<i>Хорошо</i>
<b>Средняя компетентностная оценка ВКР</b>	<i>Отлично</i>

\* Уровни оценки компетенции:

**«Отлично»** – студент освоил данную компетенцию на высоком уровне. Он может применять (использовать) её в нестандартных производственных ситуациях и ситуациях повышенной сложности. Обладает отличными знаниями и умениями по всем аспектам данной компетенции. Владеет полными навыками применения данной компетенции в производственных и (или) учебных целях.

**«Хорошо»** – студент полностью освоил компетенцию, эффективно применяет её при решении большинства стандартных производственных и (или) учебных задач, а также в некоторых нестандартных ситуациях. Обладает хорошими знаниями и умениями по большинству аспектов данной компетенции.

«Удовлетворительно» – студент не полностью освоил компетенцию. Он достаточно эффективно применяет приобретенные знания при решении стандартных производственных и (или) учебных задач. Обладает хорошими знаниями по многим важным аспектам данной компетенции.

«Неудовлетворительно» – студент не освоил или находится в процессе освоения данной компетенции. Он не способен применять знания, умение и владение компетенцией как в практической работе, так и в учебных целях.

## 6. Замечания по ВКР

1. Материалы подраздела 2.1 следовало бы привести в разделе «Анализ состояния вопроса».

2. Результаты экспериментальных исследований (раздел 4) следовало предоставить по отдельности согласно разработанной программы и методики (раздел 3).

3. К сожалению, в работе нет методики и результатов обработки опытных данных.

4. Объем выпускной квалификационной работы завышен (132 стр.)

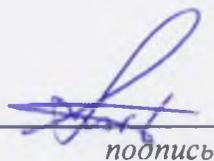
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рецензируемая выпускная квалификационная работа отвечает (не отвечает) предъявляемым требованиям и заслуживает оценки отлично, а ее автор Ахтямов Айнур Айратович достоин (не достоин) присвоения квалификации «Магистр»

Рецензент:

Д.т.н., профессор

учёная степень, ученое звание

  
подпись

Нуруллин Э.Г.

Ф.И.О

«2» 02 2022 г.

С рецензией ознакомлен\*



подпись

Ахтямов А.А.

Ф.И.О

«3» 02 2022 г.

\*Ознакомление обучающегося с рецензией обеспечивается не позднее чем за 5 календарных дней до дня защиты выпускной квалификационной работы.

## ОТЗЫВ

научного руководителя выпускной квалификационной работы  
(магистерской диссертации)

Ахтямова А.А. на тему «Разработка и исследование комбинированного  
устройства снижения токсичности отработавших газов дизелей,  
используемых в сельском хозяйстве»

За время работы над магистерской диссертацией Ахтямов А.А. зарекомендовал себя как добросовестный и исполнительный специалист. Выполняя разделы диссертации, Ахтямов А.А. в полной мере использовал все знания, полученные им в процессе обучения в Казанском ГАУ.

К выполнению своей магистерской диссертации он приступил вовремя и реализовывал все этапы своей работы согласно выданному заданию.

При разработке технологии и устройства снижения токсичности отработавших газов дизелей Ахтямов А.А. показал научные и инженерные навыки.

В процессе реализации магистерской диссертации Ахтямов А.А. использовал всю необходимую техническую литературу.

Магистерская диссертация выполнена им аккуратно и содержит все необходимые разделы.

Ахтямов А.А. показал себя способным четко определять и формулировать цели и задачи, анализировать полученные результаты, самостоятельно определять пути решения научно-исследовательских задач.

Представленная магистерская диссертация соответствует всем необходимым требованиям и заслуживает положительной оценки. А сам Ахтямов А.А. заслуживает присвоения ему квалификации «магистр» по направлению подготовки «Агроинженерия».

Руководитель, д.т.н., доцент

Валиев А.Р.

С отзывом ознакомлен:

Ахтямов А.А.

03.02.2022

## АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков, 22 таблицы, 74 литературных источника и 4 приложения.

Ключевые слова: сельское хозяйство, эффективность работы, снижение токсичности, отработавшие газы, дизельные двигатели, качество очистки, энергоёмкость.

Цель работы. Снижение токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей, используемых в сельском хозяйстве.

Объект исследований: процессы очистки отработавших газов от токсичных компонентов и устройство, её обеспечивающее.

Предмет исследований: установление зависимостей топливно-экономических показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и токсичности ОГ от мощности и режимов работы ДВС при использовании устройства очистки.

В результате теоретического и экспериментального анализа определены зависимости удельных показателей эффективности работы комбинированного устройства снижения токсичности (КУСТ) отработавших газов от геометрических параметров реактора и гранул катализатора, исследована и установлена его эффективность.

Обоснованы геометрические параметры устройства, обеспечивающие максимальную эффективность его работы. Установлена экономическая эффективность и целесообразность применения комбинированного устройства снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей.

## ANNOTATION

The Master's thesis is presented on 133 pages of typewritten text, contains 50 figures, 22 tables, 74 literary sources and 4 appendices.

Keywords: agriculture, work efficiency, reduction of toxicity, exhaust gases, diesel engines, cleaning quality, energy intensity.

The purpose of the work. Reducing the toxicity of exhaust gases (exhaust) of diesel engines used in agriculture.

The object of research: the processes of cleaning exhaust gases from toxic components and the device that provides it.

Subject of research: establishment of dependences of fuel and economic indicators of internal combustion engines (internal combustion engines) and exhaust gas toxicity on the power and operating modes of the internal combustion engine when using a cleaning device.

As a result of theoretical and experimental analysis, the dependences of the specific performance indicators of the combined device for reducing the toxicity (BUSH) of exhaust gases on the geometric parameters of the reactor and the catalyst granules were determined, its effectiveness was investigated and established.

The geometrical parameters of the device, ensuring maximum efficiency of its operation, are substantiated. The economic efficiency and expediency of using a combined device for reducing the toxicity of exhaust gases of diesel engines have been established.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ.....	11
1.1 Состав отработавших газов и токсичность их компонентов.....	11
1.2 Влияние сельскохозяйственной техники на окружающую среду...	16
1.3 Анализ процесса образования токсичных компонентов в камере сгорания дизельных двигателей .....	21
1.4 Способы и средства снижения токсичности отработавших газов двигателей.....	24
1.5 Выводы. Цель и задачи исследования.....	44
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ОТ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ .....	47
2.1 Анализ теоретических исследований очистки отработавших газов дизелей .....	47
2.2 Описание комбинированного устройства снижения токсичности отработавших газов дизеля .....	50
2.3 Анализ химических реакций, протекающих в КУСТ .....	53
2.4 Газодинамические процессы, протекающие в КУСТ .....	56
2.4.1 Обоснование геометрических параметров входной части КУСТ .....	57
2.4.2 Обоснование геометрических параметров выходной части устройства .....	61
2.4.3 Разработка и обоснование зоны засыпки катализатора .....	62
2.4.4 Обоснование геометрических параметров Г-образного патрубка .....	66
2.4.5 Расчёт газодинамического сопротивления эжекторного сопла ....	68
2.4.6 Общее газодинамическое сопротивление КУСТ.....	69
2.5 Математическая модель описания процессов, протекающих в устройстве снижения токсичности.....	70

2.6 Выводы .....	75
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	76
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	76
3.2 Методика проведения стендовых исследований .....	76
3.2.1 Подготовка оборудования для проведения экспериментальных исследований .....	79
3.2.2 Определение мощности ДВС .....	80
3.2.3 Замер дымности отработавших газов.....	81
3.2.4 Определение концентраций токсичных компонентов .....	83
3.2.5 Измерение часового расхода топлива .....	85
3.2.6 Измерение давления отработавших газов.....	88
3.2.7 Измерение температуры отработавших газов .....	89
3.2.8 Определение коэффициента загрязнения сетки.....	91
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....	93
4.1 Результаты стендовых исследований.....	93
4.2 Выводы .....	101
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ.....	103
5.1 Методика расчёта экономического эффекта устройства очистки .	103
5.2 Оценка экономической эффективности устройства очистки .....	114
5.3 Выводы .....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	120
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	128
Приложение А. Таблица А1 - Соотношение единиц измерения дымности и концентрации сажи.....	129
Приложение Б. Таблица Б1 - Результаты экспериментальных исследований.....	130

Приложение В. Таблица В1 - Физические параметры отработавших газов при нормальных атмосферных условиях.....131

Приложение Г. Таблица Г1 - Результаты исследования металлической сетки.....132

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В сельском хозяйстве нашли широкое применение дизельные двигатели внутреннего сгорания (ДВС), вместе с тем при работе они выбрасывают в атмосферу большое количество вредных газообразных веществ, которые отрицательно влияют на здоровье людей, приводят к снижению урожайности и продуктивности животных.

В настоящее время введены более жёсткие ограничения на допустимую концентрацию в отработавших газах (ОГ) оксидов азота  $\text{NO}_x$  и сажи.

Решением Правительства от 20.01.2012 г. №2 установлены следующие нормы концентрации вредных веществ в отработавших газах дизельных ДВС:  $\text{CO}$  - 1,5 г/кВт·ч,  $\text{CH}$  - 0,26 г/кВт·ч,  $\text{NO}_x$  - 2,00 г/кВт·ч,  $\text{C}$  - 0,08 г/кВт·ч.

Ужесточение норм на токсичность обуславливает необходимость разработки новых и улучшение существующих способов и средств очистки отработавших газов дизельных ДВС, обладающих высокой степенью очистки и большим сроком службы, а также минимальным воздействием на топливно-экономические показатели двигателей.

Предлагается гипотеза, что очищать ОГ от загрязняющих веществ можно комбинированным устройством снижения токсичности, включающим несколько ступеней очистки, с минимальным воздействием на топливно-экономические показатели ДВС. Разработка устройства для снижения токсичности ОГ при эксплуатации дизельных ДВС является одной из важнейших задач, выполнение которой имеет существенное значение для сельского хозяйства страны.

Степень разработанности темы. Для снижения токсичности ОГ дизельных ДВС используются следующие способы: изменение конструкции ДВС; применение альтернативных видов топлива; улучшение качества топлива; оптимизация режимов работы ДВС; поддержание технически исправного состояния транспортных средств (ТС); очистка ОГ в выпускной системе двигателя. Однако использование разработанных средств очистки

ОГ на основе существующих способов недостаточно эффективно: низкая степень очистки; высокая стоимость; небольшой срок службы; металлоёмкие.

Цель исследований. Снижение токсичности отработавших газов дизелей, используемых в сельском хозяйстве.

Задачи исследований:

- разработать и обосновать конструктивно-технологическую схему комбинированного устройства для очистки отработавших газов дизелей;
- разработать математическую модель описания процессов, протекающих в устройстве при очистке отработавших газов;
- провести экспериментальные исследования и определить зависимости удельных показателей эффективности устройства;
- провести испытания устройства очистки отработавших газов в производственных условиях;
- провести оценку экономической эффективности устройства снижения токсичности и установить целесообразность его применения.

Объект исследований: процессы очистки отработавших газов от токсичных компонентов и устройство их обеспечивающее.

Предмет исследований: установление зависимостей топливно - экономических показателей ДВС, токсичности ОГ от мощности и режимов работы ДВС при использовании устройства очистки.

Научная новизна:

- классификация способов и средств снижения токсичности отработавших газов дизелей;
- конструктивно-технологическая схема устройства очистки отработавших газов дизелей;
- математическая модель процессов, протекающих в устройстве при очистке отработавших газов;
- зависимость коэффициента загрязнения металлической сетки от её массы;

- усовершенствованная методика расчёта экономической эффективности устройства снижения токсичности отработавших газов дизелей.

Практическая значимость. Использование комбинированного устройства снижения токсичности ОГ дизельных двигателей мощностью 150-220 кВт позволяет снизить вредные выбросы: сажи - на 80%, СО - на 60%, NO<sub>x</sub> - на 55%, СН - на 45%.

Результаты исследований могут быть использованы предприятиями агропромышленного и автотранспортного комплексов, эксплуатирующими мобильную технику с дизельными двигателями, научно-исследовательскими и конструкторскими организациями при разработке средств снижения токсичности ОГ дизельных ДВС, а также в учебном процессе вузов.

Методика исследований. В теоретических исследованиях использовались законы газовой динамики и физико-химических процессов. Экспериментальные исследования проводились на основе общих и частных методиках испытания ДВС на топливную экономичность, дымность и токсичность. При этом использовались современные способы измерений и приборы, обработка экспериментальных данных проводилась методом математической статистики.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- классификация способов и средств снижения токсичности отработавших газов дизелей;
- конструктивно-технологическая схема устройства очистки отработавших газов дизелей;
- математическая модель газодинамических и физико-химических процессов, протекающих в устройстве снижения токсичности отработавших газов;
- зависимости критериев эффективности устройства очистки отработавших газов дизелей от мощности и режимов работы двигателя;

- усовершенствованная методика расчёта экономической эффективности средств снижения токсичности отработавших газов дизелей.

- зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний устройства очистки отработавших газов дизелей.

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методик и оборудования, достаточным количеством экспериментов, соответствием экспериментальных данных теоретическим результатам исследований.

Апробация работы проводилась на конференциях Казанского ГАУ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков, 22 таблиц, список литературы из 74 наименований, 4 приложений.

# 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ

## 1.1 Состав отработавших газов и токсичность их компонентов

Отработавшие газы ДВС представляют собой сложную смесь газов, паров, жидкостей и твердых частиц. Смесь состоит из более 1000 химических образований (соединений) [1-3].

Состав ОГ бензинового ДВС и дизеля представлен в таблице 1.1 [2-5].

Таблица 1.1 - Состав отработавших газов ДВС

Компонент	Содержание, %	
	Бензиновый ДВС	Дизельный ДВС
N <sub>2</sub>	74... 77	76...78
O <sub>2</sub>	0,3...5	2...8
CO <sub>2</sub>	5...12	1...10
CO	1...5	0,01... 0,50
NO <sub>x</sub>	0...0,8	0,001... 0,400
CH	0,2...3,0	0,01...0,10
Альдегиды	0...0,2	0... 0,002
Пары воды	3...5,5	0,5...4,0

Из таблицы 1.1 видно, что бензиновые двигатели по содержанию токсичных компонентов более ядовиты, чем дизельные, основную часть загрязняющих веществ составляет оксид углерода (II).

Если процесс сгорания топлива был бы идеальным, то в результате образовывались только оксиды углерода (CO<sub>2</sub>) и молекулы воды (H<sub>2</sub>O) [1, 3, 6]. Но, так как в атмосфере присутствуют различные газы, то при сгорании смеси топлива и воздуха образуются оксид углерода (II), оксиды азота (NO<sub>x</sub>), альдегиды, сажа, углеводороды (CH), диоксида серы (SO<sub>2</sub>), формальдегиды,

бензол, сульфид водорода, перекисные соединения и полициклические ароматические углеводороды (бензапирен) [1,6].

Усредненный состав основных вредных компонентов в ОГ при работе ДВС на режиме полной нагрузке приведен в таблице 1.2 [3, 4, 7, 8].

Таблица 1.2 - Количественный состав ОГ дизельных двигателей

Компонент ОГ	Концентрация, г/м <sup>3</sup>	Удельное выделение, г/кВт·ч
СО	0,25...2,5	1,5... 12,0
SO <sub>2</sub>	0,1...0,7	0,4... 2,5
Акролеин	0,01... 0,04	0,06...0,2
СН	0,25...2,0	1,5...8,0
Бензапирен	$0,2 \cdot 10^{-6} \dots 0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6} \dots 0,5 \cdot 10^{-6}$
NO <sub>x</sub>	2...8	10...30
в т.ч. NO <sub>2</sub>	0,1...0,8	0,5...2,0
NO	1,2...4,5	6...18
Сажа	0,05...0,5	0,25...2,0

Анализ таблицы 1.2 показывает, что из всех токсичных компонентов наибольшую концентрацию составляют оксиды азота, которые относятся ко второму классу опасности. По удельным выделениям компонентов ОГ можно сделать вывод, что работать на полной нагрузке дизелей необходимо меньше.

Национальный институт профессиональной безопасности и здоровья (NIOSH, США) установил, что отработавшие газы дизельных двигателей содержат вещества, которые вызывают раковые заболевания, то есть они являются канцерогенами [1,7].

По степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделяются на четыре класса опасности [1,3]:

1. Чрезвычайно опасные.

2. Высокoопасные.
3. Умеренно опасные.
4. Малоопасные.

К первому классу опасности относится бензапирен, содержащийся в ОГ дизелей, по остальным канцерогенам класс опасности не установлен.

Вредные вещества, содержащиеся в ОГ, оказывают влияние на человека при определённой концентрации, поэтому для них установлены предельно допустимые концентрации (ПДК), которые определяются по полному отсутствию их воздействия на человека. ПДК основных токсичных компонентов ОГ и их классы опасности представлены в таблице 1.3 [3, 8, 9].

Таблица 1.3 - ПДК основных токсичных компонентов ОГ дизеля

Компонент	Класс опасности	Предельно допустимые концентрации, мг/м		
		В воздухе рабочей зоны	Среднесуточная в атмосфере населенных пунктов	Максимальная разовая
Сажа	3	3,5	0,05	0,15
СО	4	20,0	3,0	5,0
NO <sub>x</sub>	2	2,0	0,04	0,085
СН <sub>x</sub>	2-4	-	1,5	5,0
Акролеин	2	0,7	0,03	0,03
Формальдегид	3	0,5	0,035	0,035
SO <sub>2</sub>	3	10,0	0,05	0,50
Бензапирен	1	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	-

Наиболее опасными токсичными веществами, содержащимися в ОГ дизелей, следует считать бензапирен, так как он является канцерогеном, и сажа, из-за того, что она является агломератом для бензапирена. Затем по

токсичности идут: оксид углерода, углеводороды, оксиды азота, диоксид серы [10, 11].

Определяющие компоненты выбросов дизеля представлены в таблице 1.4 [1,9-11].

Таблица 1.4 — Концентрация определяющих компонентов выбросов ОГ дизельных двигателей

C(CO)	C(CH)	C(C)	C(NO <sub>x</sub> )	C(SO <sub>2</sub> )
млн <sup>-1</sup>	млн <sup>-1</sup>	г/м <sup>3</sup>	млн <sup>-1</sup>	млн <sup>-1</sup>
5... 1500	20... 400	0,25...0,1	50...2500	10... 150

При неполном сгорании топливовоздушной смеси и масла, поступающего в камеру сгорания через неплотности цилиндропоршневой группы (ЦПГ) образуются оксид углерода (CO), углеводороды (CH) и альдегиды.

Оксид углерода (II) высокотоксичное вещество: при вдыхании человеком воздуха в течение нескольких часов с концентрацией CO 0,01 - 0,02 %, возможно отравление; при концентрации 2,4 мг/м<sup>3</sup> через 30 мин. наступает обморочное состояние. Это происходит из-за того, что CO реагирует с гемоглобином крови и наступает кислородное голодание, которое вызывает расстройство нервной системы человека [1, 6, 7, 9].

Углеводороды и альдегиды формируют запах ОГ при сгорании дизельного топлива. Они способны вызывать раздражение глаз, горла, носа. Ароматические углеводороды представляют большую опасность, так как в условиях воздействия на теплокровных существ они поражают центральную нервную систему, приводя к сонливости, вялости и судорогам, в условиях постоянного пребывания в организме оказывают политропное действие, поражая ряд органов и систем. Бензапирен оказывает сильное канцерогенное, мутагенное, тератогенное действие, поэтому он наиболее опасен. Формальдегид поражает центральную нервную систему, органы зрения,

печень, почки, оказывает сильное раздражающее аллергенное, канцерогенное, мутагенное действие [1, 3, 9].

Содержание оксидов азота в ОГ определяет характер действия на человека и окружающую среду. Оксиды азота реагируя с влажной поверхностью в организме человека образуют азотную и азотистую кислоты, которые приводят к рефлекторным расстройствам, поражают ткань лёгких, что приводит к их отёку, приводят к недостатку кислорода в крови, оказывая прямое действие на центральную нервную систему. Для поражения наиболее чувствительных растений достаточно концентрации  $38 \text{ мг/м}^3$ . Даже при небольших концентрациях от  $5 \text{ мг/м}^3$  до предельно допустимой концентрации (ПДК), но при постоянном воздействии снижается иммунноустойчивость, нарушается система воспроизводства низших млекопитающих [1, 3, 9].

Диоксид серы (сернистый ангидрид), содержащийся в отработавших газах, нарушает иммунную систему организма, оказывая общетоксичное действие на теплокровных, вызывая хронические отравления. Вызывает расстройство сердечнососудистой системы, легочно-сердечную недостаточность, нарушает деятельность почек. Диоксид серы оказывает токсичное действие на окружающую природу: ускоряется коррозия металлов, разрушаются строительные конструкции, снижается плодородность почвы из-за её закисления [1, 9, 10].

Сажевые частицы ОГ дизельных ДВС являются агломератами для канцерогенных веществ - полициклических ароматических углеводородов (бензапирен) [10, 12].

Наибольшую опасность представляют наночастицы диаметром менее 50нм, способные проникать глубоко в легкие человека и способствовать возникновению раковых заболеваний [3, 10, 13].

Анализируя состав и токсичность компонентов отработавших газов дизелей можно сделать вывод, что наиболее опасные вещества ПАУ, в частности бензапирен, которые являются канцерогенами. Так как для ПАУ

агломератом является сажа, содержащаяся в ОГ, то чем меньше будет её концентрация, тем меньше будет образовываться канцерогенов.

Поэтому необходимо разрабатывать способы и средства снижения токсичности, обладающие высоким качеством очистки ОГ от сажи и ресурсом работы.

## 1.2 Влияние сельскохозяйственной техники на окружающую среду

Эксплуатация сельскохозяйственной техники оказывает отрицательное влияние на окружающую среду, которое влечёт за собой последствия, представленные на рисунке 1.1 [14]. Уменьшение влияния и исключение данных последствий является одной из важнейших задач при обеспечении экологической безопасности [3, 14].

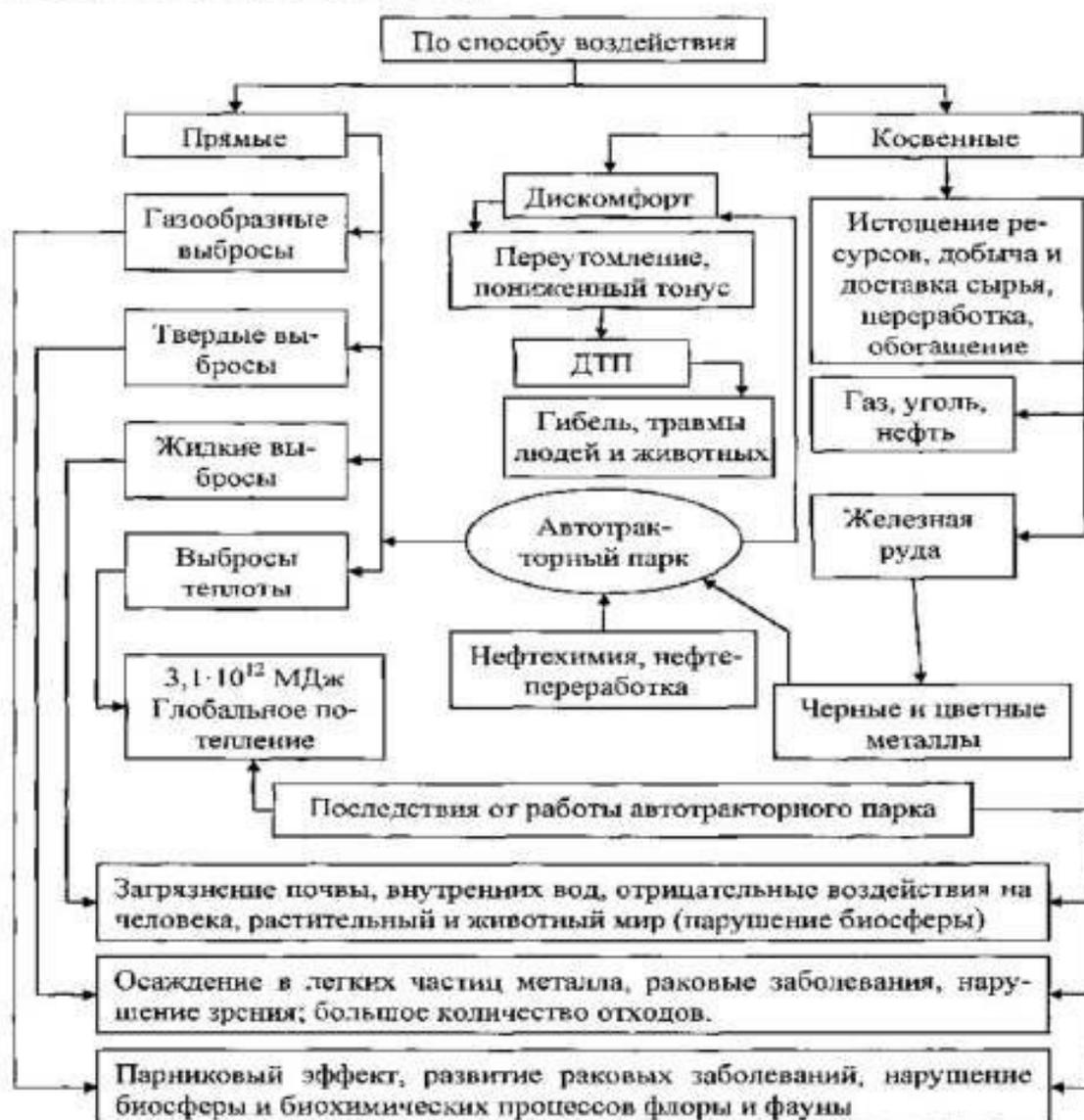


Рисунок 1.1 - Схема воздействия автотракторного парка на окружающую среду

Основными видами прямого воздействия техники на природную среду являются выбросы: газообразные, твердые, жидкие и выбросы теплоты. К косвенным видам относятся: истощение ресурсов, а также дискомфорт человека и дорожно-транспортные происшествия (ДТП), приводящие к травмам и гибели людей [14].

По степени отрицательного воздействия на окружающую природную среду первое место занимают газообразные выбросы [1, 15-17]. В Российской Федерации только дизелями тракторов и комбайнов выбрасывается свыше 5 млн. т вредных веществ в год [1, 3]. В таблице 1.5 представлен перечень источников выбросов вредных веществ автотракторной техники с дизельными ДВС (661173 ед.) в РФ за 2011 год [1, 10, 18].

Таблица 1.5 - Выбросы вредных веществ дизельной автотракторной техники

Вид техники	Выбросы вредных веществ, млн.т				
	Оксиды азота	Оксид углерода	Углеводороды	Оксиды серы	Сажа
Тракторы в сельском хозяйстве	1,50	0,80	0,15	0,10	0,06
Прочие тракторы и самоходные машины	1,20	0,64	0,12	0,08	0,03
Комбайны	0,30	0,16	0,03	0,01	0,01
Итого	3,00	1,60	0,30	0,19	0,10

Анализ таблицы 1.5 показывает, что наибольший выброс 57,8% составляют оксиды азота, 30,8% - оксиды углерода, что говорит о существенном загрязнении окружающей среды вредными веществами 2-го и 4-го классов опасности [1, 3, 10].

Высокую экологическую опасность представляют разливы горюче-смазочных материалов (ГСМ), возникающие в результате аварий и технической эксплуатации сельскохозяйственной техники, загрязнение аккумуляторной кислотой, стоковыми водами при мойке техники, моющими средствами, эксплуатационными материалами (охлаждающая, тормозная жидкости) [3, 10, 14].

Особую опасность представляют выбросы металлов (медь, никель, хром, молибден, ванадий) при истирании тормозных колодок и фрикционных материалов в воздух и почву, (кадмий, свинец, цинк) при износе резиновых изделий (покрышек), так как в них содержится сажа, которая способствует проникновению этих металлов в организм человека [1, 3, 10].

Дизельные ДВС являются высокотоксичными вследствие повышенного содержания оксидов азота, бензола, сажи и альдегидов, что вызвано высоким соотношением топливо-воздух, то есть на 1 кг топлива требуется большое количество воздуха (16 кг), несмотря на то, что, по сравнению с бензиновыми ДВС, имеют меньшие выбросы оксидов углерода и углеводородов. При сгорании 1 кг дизельного топлива выделяется около 80... 100 г токсичных компонентов (20...30 г CO, 20...40 г NO<sub>x</sub>, 4... 10 г CH, 10...30 г SO<sub>x</sub>, 0,8... 1,0 г альдегидов, 3...5 г сажи и др.). Выбросы дизелей в атмосферу оксидов азота составляют 20-26 % от выбросов всех транспортных источников [1, 10].

По исследованиям, проведённым в работах [1, 3, 10, 19, 20], приоритет по экологической опасности принадлежит NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и сажевым частицам. Снижение выбросов именно этих веществ необходимо обеспечить в первую очередь. Весомую роль в загрязнении воздуха играют выбросы SO<sub>2</sub>, CO и

бензапирена. Но на сегодняшний день особо опасными загрязняющими веществами в ОГ дизелей являются бензапирен и сажа, снижение концентраций которых и является первостепенной задачей.

По опубликованным данным, для России в целом, грузовые автомобили оказывают определяющую роль в загрязнении атмосферы, которые, в основном, оснащаются дизельными ДВС, на их долю приходится более 50% всех вредных выбросов. На втором и третьем местах находятся легковые автомобили и автобусы [1, 19].

Токсичные вещества, при эксплуатации ДВС, выделяются вместе с ОГ, испарениями топлива и картерными газами. С топливными испарениями выбрасывается в атмосферу вследствие не герметичности топливной системы всего 8% СН. Поэтому, при определении степени токсичности ОГ дизелей, топливными испарениями можно пренебречь.

Картерные газы образуются вследствие неплотности ЦПГ из-за износа и представляют собой несгоревшие углеводороды, которые с парами топлива и масла попадают в картер ДВС. Они оставляют 0,2...0,3% общего выброса токсичных веществ для дизельных двигателей [1,3, 10].

Отработавшие газы, поступающие из цилиндров ДВС в выпускную систему, являются основным источником загрязнения атмосферы, так как представляют собой продукты полного и неполного сгорания топливовоздушной смеси. При определении степени токсичности ОГ возникает сложность, которая заключается в широком диапазоне изменения концентраций загрязняющих веществ, поэтому измеряют выброс отдельных составляющих различными физическими, физико-химическими и химическими методами [3, 20].

Частицы саж, образующиеся в результате неполного сгорания топливо-воздушной смеси в цилиндрах ДВС, являются опасными накопителями канцерогенных веществ, которые вызывают раковые заболевания. Проводя аналогию с бензиновыми двигателями можно сказать, что дизели выбрасывают в атмосферу в 10... 1000 раз больше мельчайших

частиц сажи, чем бензиновые. По массе выброс таких частиц достигает до 1% от расхода топлива [1,3, 10, 20].

Расход ОГ у дизелей выше, чем у бензиновых двигателей, вследствие высокой степени наполнения цилиндров, а концентрация продуктов неполного сгорания в 5... 10 раз ниже. При этом, массовые выбросы дизелей и бензиновых ДВС одной мощности можно сопоставить [1, 10].

Анализ влияния техники, используемой в сельском хозяйстве, на окружающую среду позволяет сделать вывод, что в настоящее время основной проблемой обеспечения экологической безопасности является снижение токсичности ОГ ДВС, установленных на ней, также уменьшение и исключение жидких, твёрдых выбросов и сохранение природных ресурсов страны.

В развитых странах мира для обеспечения экологической безопасности устанавливаются пределы на выбросы загрязняющих веществ с ОГ двигателей в атмосферу, что способствует разработке новых способов и средств, направленных на снижение токсичности отработавших газов.

В России приняты нормы токсичности дизельных автотранспортных средств (таблица 1.6) [1, 10, 21].

Таблица 1.6 - Нормы токсичности по правилам ЕЭК ООН, г/кВт·ч

Ступень	Год введения	Сажа	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	СО
ЕВРО-1	1993	0,36	8,0	1,1	4,5
ЕВРО-2	1996	0,15	7,0	1,1	4,0
ЕВРО-3	2000	од	5,0	0,66*	2,1
ЕВРО-4	2005	0,02	3,5	0,46*	1,5
ЕВРО-5	2008	0,02	2,0	0,25*	1,5

Примечание. \* углеводороды, не относящиеся к метановым

Из таблицы следует, что снижение вредных выбросов ОГ дизельных двигателей в России будет значительным только в том случае, если на рынок автотракторной техники будет поступать автотракторная техника, соответствующая нормам «Евро-4» и «Евро-5», и будет проведена модернизация уже эксплуатируемой техники, направленная на соответствие данным нормам.

### 1.3 Анализ процесса образования токсичных компонентов в камере сгорания дизельных двигателей

При сгорании топливовоздушной смеси в цилиндрах двигателя в реальных условиях ОГ содержат следующие продукты: оксид углерода (II) и (IV), углеводороды, альдегиды, частицы сажи, ПАУ, перекисные соединения, оксиды азота и сернистый ангидрид и т.д. При идеальном сгорании должны присутствовать лишь  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  [1,3 10].

Сажа, смешанная с ОГ, образует дым. Дым оценивается как «видимый» уже при содержании в нем 133 мг углерода на 1 м<sup>3</sup> ОГ и как дым средней черноты - при 600 мг/м<sup>3</sup>. Сажа представляет собой частицы углерода неправильной формы с линейными размерами 0,3... 100 мкм [1, 3, 10, 23, 24].

В результате термического разложения углеводородов, происходящего при пиролизе (недостаток кислорода, при значениях коэффициента избытка воздуха  $\alpha=0,33...0,7$ ), образуется сажа. Данный процесс описывается уравнением [1, 3 25]:



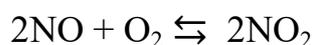
С увеличением температуры и давления в цилиндрах двигателя при недостатке кислорода в процессе сгорания количество образующейся сажи растёт, так как находится от данных параметров в прямой зависимости.

Количество образующейся сажи находится в прямой зависимости от температуры и давления в зоне пиролиза. С ростом температуры и давления это количество резко увеличивается. К образованию частиц сажи приводят

многие процессы, протекающие в цилиндрах двигателей при температурах от 3500 до 100К. При температуре 3500К происходит дегидрогенизация углеводорода топлива, что приводит к образованию сажи, при меньших температурах получают: атомарный углерод, ацетилены, полиацетилены, олефиновые соединения, конденсирующиеся ароматики, которые также приводят к образованию сажевых частиц. При температуре 100К происходит агломерация углеводородов топлива, и, как следствие, образование сажи. Процесс сгорания, характеризующийся равновесием между скоростями горения и распада углеводорода топлива, соответствует максимальному содержанию частиц сажи в отработавших газах [3, 10].

Из всех ПАУ, обладающих канцерогенным действием, большую часть в ОГ составляет бензапирен, по которому и принято характеризовать канцерогенные свойства отработавших газов. Бензапирен образуется при температуре 670...970 К в результате гидролиза тяжелых фракций топлива и моторных масел при значительном недостатке кислорода. Износ цилиндропоршневой группы и повышенный расход масла в десятки раз увеличивают содержание бензапирена в ОГ дизеля [1, 3, 10].

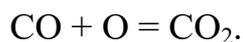
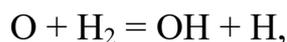
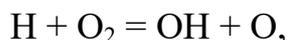
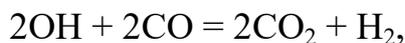
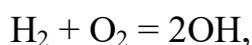
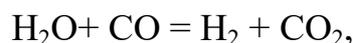
В отработавших газах дизелей содержится более 10 различных окислов азота, на долю NO приходится более 95%, остальные распадаются до NO<sub>2</sub> и кислорода. При температурах ниже 400°С оксид азота начинает окисляться до NO<sub>2</sub> по следующей реакции [1, 10, 24, 26]:



Процесс образования оксидов азота (NO<sub>x</sub>) не связан напрямую с реакциями горения, а имеет термическую природу. Снижение концентрации оксидов азота в ОГ вызывает определённые трудности, так как для уменьшения образования их количества температура процесса сгорания должна быть наименьшей, что приводит к снижению коэффициента полезного действия (КПД) двигателя, а для остальных продуктов неполного сгорания, наоборот, чем ниже температура, тем больше образуется их количество [3, 10].

Неравномерное распределение топлива в зоне горения приводит к наличию участков с богатой смесью, то есть происходит неполное смешивание топлива с воздухом, способствует образованию оксидов углерода (II). CO образуется и в высокотемпературных зонах топливного факела, в которых химическое равновесие смещено в сторону диссоциации оксида углерода (IV) [1, 3, 10, 23,26].

Авторы работ [1, 3, 10, 19, 20] представляют модель механизма цепной реакции образования CO следующими элементарными стадиями:



Максимальные концентрации CO достигают больших значений в камере сгорания ДВС, но так как в такте расширения и выпуска происходит их интенсивное догорание, то на выпуске содержание CO в ОГ не более 0,2% [3, 19, 23].

В отработавших газах дизелей содержится более 200 различных углеводородов, основными из которых являются этан, метан, этилен, бензол, пропан, ацетилен [1, 3, 10, 23-26].

В результате потухания пламени вблизи холодных стенок камеры сгорания образуются «зоны гашения пламени» шириной 0,05...0,38 мм, в которых реакция горения топливовоздушной смеси замедляется, затормаживая образование продуктов промежуточных реакций. Данные зоны являются основным местом образования углеводородов, остальные зоны: ядро пламени, хвост струи, зона срыва пламени, топливная плёнка и вторичный впрыск топлива. Количество СН в ОГ зависит от отношения поверхности камеры сгорания к её объёму, количества остаточных газов в цилиндре, степени турбулентности заряда, состава смеси, давления и

температуры процесса сгорания, герметичности ЦПГ и системы питания, что способствует также повышению выброса сажи [1, 3, 10, 19, 20].

В конце процесса сгорания обеднённой смеси и при охлаждении топливо-воздушной смеси сравнительно холодными стенками камеры сгорания, то есть протекание процесса при низких температурах образуются альдегиды. Максимальное содержание альдегидов в отработавших газах наблюдается при работе дизеля на малых нагрузках. Образование альдегидов протекает с выделением теплоты. [1,3, 10, 19].

Анализ процессов образования токсичных компонентов при сгорании топливовоздушной смеси в цилиндрах дизельного ДВС показал, что увеличивая температуру процесса можно снизить концентрации продуктов: сажи, оксида углерода (II), углеводородов и т.п., но это приведёт к увеличению содержания оксидов азота в ОГ, и, наоборот. Такое противоречие не позволяет добиться низкой токсичности ОГ посредством воздействия на рабочий процесс и является определяющим при выборе способов воздействия на рабочий процесс двигателя и средств очистки отработавших газов в выпускной системе дизельного двигателя.

#### 1.4 Способы и средства снижения токсичности отработавших газов двигателей

Обеспечение экологически безопасной работы двигателей возможно при их совершенствовании, улучшении конструкционных и эксплуатационных параметров, а также при ужесточение требований по допускаемым концентрациям токсичных компонентов на законодательном уровне.

Существующими способами, направленными на снижение токсичных компонентов в ОГ, являются: изменение конструкции ДВС и его систем; применение альтернативных видов топлива; улучшение качества топлива; оптимизация режимов работы ДВС; поддержание технически исправного состояния транспортного средства; очистка ОГ в выпускной системе [19, 27].

Одним из основных факторов, влияющих на рабочий процесс сгорания топливовоздушной смеси в цилиндрах двигателя является оптимизация параметров (температура, давление и т.п.) воздуха и топлива, подаваемых в рабочую зону горения, а также условия впрыска и подвода, которые определяются типом и формой камеры сгорания. Это напрямую сказывается на эффективности процесса смесеобразования и сгорания, что влияет на образование вредных веществ в ОГ [1,3].

Тенденция в развитии и совершенствовании конструкции ДВС в основном направлена на улучшение процесса смесеобразования, который в дизелях протекает в середине цилиндров и за короткий промежуток времени, и заключается в получении однородной смеси тонкораспылённого топлива.

К изменению конструкции ДВС и его систем можно отнести совершенствование топливной системы, которое направлено на лучшую подготовку топлива для получения качественной топливовоздушной смеси [1, 10, 28-30].

Для улучшения свойств дизельного топлива (ДТ) в настоящее время используется большое количество присадок. Необходимость применения присадок для дизельных топлив определяется качеством основного топлива. В ДТ вводят следующие типы присадок: депрессоры, модификаторы процесса горения, антиоксиданты, деактиваторы металлов, моюще-диспергирующие, антидымные, антикоррозионные и другие. Присадки могут входить в состав пакета или использоваться независимо друг от друга.

Применяются три типа присадок, влияющих на процесс горения дизельных топлив: улучшающие цетановое число, катализаторы горения и модификаторы отложений.

Присадки, увеличивающие полноту сгорания, действуют на всех стадиях горения. Основной их эффект заключается в экономии топлива. Кроме того, они уменьшают нагарообразование в камере сгорания и коксоотложение на распылителях форсунок, уменьшают дымность и токсичность ОГ.

Интерес к альтернативным видам топлива для автотракторной техники обусловлен тремя существенными соображениями: использование альтернативных видов топлива, даёт меньше выбросов сажи, меньше загрязнение воздуха и глобальное потепление; большинство альтернативных видов топлива производится из неисчерпаемых запасов; использование альтернативных видов топлива позволяет любому государству повысить энергетическую независимость и безопасность [10, 28-33].

Также на снижение токсичности ОГ влияет качество топлива. Всемирная Топливная Хартия, принятая ведущими производителями топлив и автомобилей, предусматривает достаточно жесткие требования к топливам [1, 3, 10, 34]. Это необходимо для выполнения международных норм по содержанию вредных веществ в ОГ двигателей. Для выполнения установленных требований конструкторы разрабатывают более совершенные двигатели, а нефтехимики и нефтепереработчики более чистые виды топлива, снижая в них содержание ненасыщенных ароматических и полициклических углеводородов и серы [27-31].

Влияние на токсичность ОГ оказывают режимы работы ДВС. При увеличении нагрузки дизеля смесь обогащается, и полнота сгорания ухудшается, возрастает выброс СО и резко повышается дымность ОГ. Поэтому снизить токсичность ОГ можно за счёт поддержания оптимальных режимов работы двигателя. Они в первую очередь зависят от условий эксплуатации ТС и квалификации водителя.

Как показывают исследования [1, 3, 10, 20], нарушение технического состояния тракторов и автомобилей в условиях эксплуатации приводит к увеличению выбросов вредных веществ на 10...20%. Поэтому своевременное проведение регламентных работ по техническому обслуживанию и ремонту, а также регулировки ДВС и трансмиссии позволят снизить токсичность ОГ.

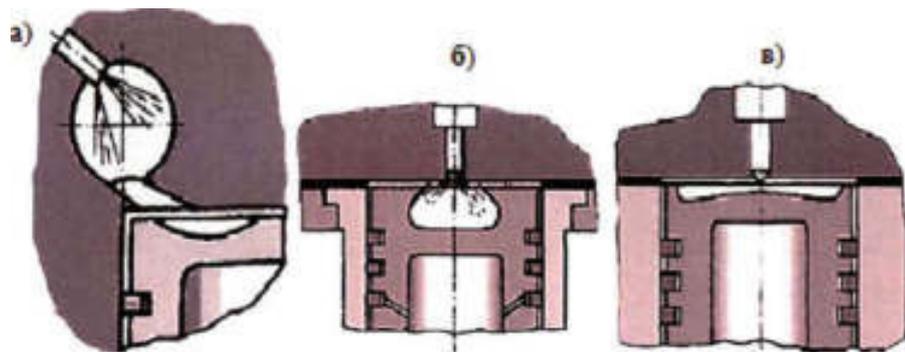
Практика показывает, что достичь уровня токсичности ОГ, требуемого законодательством, всеми существующими, в настоящее время, способами нельзя. Поэтому широкое распространение получил более эффективный

способ снижения токсичности ОГ - очистка в выпускной системе, которая основана на химических и физических свойствах компонентов ОГ.

К основным способам можно отнести нейтрализацию токсичных компонентов, вышедших из цилиндров двигателя, до выброса их в атмосферу и фильтрацию твердых частиц ОГ.

Одним из средств снижения токсичности ОГ является изменение формы камеры сгорания. Камеры сгорания дизелей по конструкции бывают разделенные, неразделенные и полуразделенные (рисунок 1.2) [28].

Конструкция неразделенной камеры сгорания дизеля, когда подача топлива и воздуха осуществляется сразу в неё, обеспечивает и гарантирует интенсивное образование струй, вихрей при обтекании предметов или при встрече двух потоков в основном процессе смесеобразования.



а) разделённая; б) полуразделённая; в) неразделённая

Рисунок 1.2 - Формы камер сгорания дизелей

Такие камеры сгорания имеют наибольший КПД. Разделённые камеры сгорания превосходят неразделённые по уменьшению образования вредных веществ, дымности и шумности, так как смесеобразование происходит в две стадии:

- на первой стадии в дополнительную камеру впрыскивается все топливо и его сгорание происходит при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha < 1$ , что позволяет ограничить образование оксидов азота, вследствие

недостатка кислорода, несмотря на то, что процесс протекает при высоких температурах;

- во второй стадии смесеобразование проходит при избытке кислорода с пониженными, температурами [3, 10, 19].

Исследования авторов [1, 3, 10, 19, 20] показали, что основными достоинствами дизелей с разделёнными камерами сгорания являются: качественный процесс образования смесей при умеренном давлении впрыска топлива (13МПа), за счёт интенсивного завихрения воздуха и смеси; нарастание давления на поршень (0,2...0,3 МПа на 1° поворота коленчатого вала) в результате дросселирования газов через соединительный канал. Но дизели с такой формой камеры сгорания имеют затруднённый пуск и повышенный расход топлива.

Полуразделённые камеры сгорания с предкамерой с изменяющейся геометрией сопла объединяют в себе преимущества неразделённой и разделённой камер сгорания [1, 10, 19].

Способ смесеобразования при полуразделённой камере сгорания обеспечивает мелкодисперсный распыл топлива и его полное сгорание. В случае пленочного смесеобразования топливо впрыскивается в камеру плотной струей и, попадая на горячую поверхность камеры сгорания, интенсивно испаряется.

Авторами работ [1,3, 10, 19, 20, 28] установлено, что для снижения образования  $\text{NO}_x$  первая стадия сгорания топлива должна осуществляться при обогащении рабочей смеси в условиях недостатка кислорода за фронтом пламени, а вторая - при обеднении и интенсивной турбулизации смеси, что предотвращает образование  $\text{NO}_x$ . Интенсивное перемешивания смеси в конечной фазе догорания топлива позволяет снизить содержание СО в ОГ. Основным недостатком полуразделённых камер сгорания является сложность конструкции.

Рециркуляция ОГ - это способ работы ДВС, при котором искусственно увеличивается доля остаточных газов. Это достигается регулированием фаз

газораспределения, либо за счёт соединения впускного и выпускного трубопроводов рециркуляционным через клапан (рисунок 1.3). Применение 10%-ой рециркуляции ОГ может снизить  $\text{NO}_x$  на 30% без существенного повышения расхода топлива. Поэтому системы рециркуляции являются эффективными средствами снижения содержания оксидов азота в ОГ. Но рециркуляция приводит к повышению выброса частиц и дымности ОГ, а также к ухудшению параметров рабочего процесса [1, 10, 28].



Рисунок 1.3 - Клапан возврата ОГ дизелей

За счёт торможения предпламенных процессов, гомогенизации топливного заряда в объеме камеры сгорания, сокращения количества топлива, достигающего холодных стенок камеры, и турбулизации смеси в период догорания топлива можно снизить содержание сажи в ОГ [1, 3, 19].

На уменьшение содержания в ОГ углеводородов влияют сокращение периода задержки воспламенения и турбулизации топливовоздушной смеси во второй период диффузионного сгорания. Регулировки дизеля, как составная часть комплексной системы снижения токсичности, сводятся к уменьшению угла опережения впрыска топлива и увеличению коэффициента избытка воздуха [1,3, 10, 29-34].

Присадки, улучшающие цетановое число (ЦЧ), контролируют процесс воспламенения топлива в момент его впрыскивания в камеру сгорания. В качестве присадок, улучшающих цетановое число, применяют

алкилнитриты, нитраты, нитросоединения, оксиды. Введение этих присадок, концентрация которых, как правило, составляет 0,05-0,20%, позволяет повысить ЦЧ в среднем на 6-8 пунктов [29-31, 32-34].

Многие годы алкилнитраты преобладали в качестве коммерческих цетановых присадок, в настоящее время распространение получили октилнитраты, они стабильны при обычной температуре и не воспламеняются. Типы присадок более сложной структуры, такие, как нитросоединения, оксиды, могут выполнять аналогичную функцию, но не используются из-за их высокой стоимости и взрывоопасности. К недостаткам алкилнитратнитритных присадок относится их коррозионная активность, токсичность, склонность к смолообразованию.

Присадки, увеличивающие полноту сгорания, действуют на всех стадиях горения. Основной их эффект заключается в экономии топлива. Кроме того, они уменьшают нагарообразование в камере сгорания и коксоотложение на распылителях форсунок, уменьшают дымность и токсичность ОГ. Существуют три механизма действия присадок [29, 30, 35]:

- ионный (присадки, содержащие натрий, кальций, цезий, барий);
- радикальный (присадки, содержащие кальций, барий, стронций);
- каталитического дожига (присадки, содержащие марганец, железо, кобальт, никель).

Наиболее эффективные антидымные присадки содержат теплорастворимые соединения бария. При концентрации 0,1-0,5% масс, они позволяют снизить дымность ОГ двигателей на 30-90%. Примеры композиций присадок, снижающих дымность и токсичность ОГ, представлены в таблице 1.7. Интервал оптимальных концентраций присадок данного вида составляет 50-200мг/кг топлива [1, 3, 10, 28-31].

Антидымные присадки не позволяют снизить выбросы оксидов углерода, серы, бензапирена и других компонентов ОГ.

Таблица 1.7 — Присадки, снижающие токсичность дизельного топлива

Присадки	Концентрация, %	Уменьшение содержания, %	
		Дыма	Оксидов азота
Диметиловые эфиры димеров и тримеров олеиновой кислоты	0,03	85	-
Фенолята никеля, железа, меди	0,034	20-25	5-11
Соли кальция с растворяющимся агентом	0,1	55	-

Из альтернативных видов топлива, которые широко распространены, можно назвать: природный газ (сжиженный и сжатый), этанол, биотопливо и водород [36].

Природный газ представляет собой альтернативный вид топлива, которое полностью сгорает и уже сейчас повсеместно доступно потребителям многих стран за счет снабжения природным газом домов и производственных объектов. При использовании в транспортных средствах, работающих на природном газе (автомобилях и грузовиках со специально спроектированными двигателями) снижаются выбросы углекислого газа на 20% и оксидов азота на 95% [37].

Сжатый газ (метан, природный газ, биогаз) достаточно давно используется как горючее для ДВС. Метан - это природный газ, который по магистральным газопроводам поступает в крупные города и сгорает в конфорках бытовых газовых плит. Так как запасы метана практически неограниченны, он очень дешев.

Преимущества сжатого газа: значительные запасы и возможность получения из возобновляемых источников; меньше токсичность выхлопных газов; конструктивные изменения в бензиновых автомобилях незначительные, но больше, чем при переоборудовании на сжиженный газ. Недостатки: большие, тяжелые и дорогостоящие газовые баллоны; высокая,

по сравнению с переоборудованием на сжиженный газ, стоимость работы; при транспортировке природного газа возможны его утечки.

Сжиженный газ. Этот вид моторного газообразного топлива распространен значительно шире. Это пропан-бутановая смесь - сопутствующий газ, который получают при добыче и переработке нефти (продукты стабилизации газового конденсата, попутный газ при добыче нефти и природный газ (при его переработке)). Пропан-бутан можно хранить в сжиженном виде под давлением в 16 атмосфер, в стальном баллоне емкостью 50-80 л, который весит не более 4070 килограммов [36, 37].

Еще одним видом сжиженного газа является диметиловый эфир, который, в ближайшие годы, может стать альтернативой дизельному топливу. Диметил-эфир - это сжиженный газ, который вырабатывается из природного метана. Он характеризуется высоким цетановым числом (55-60 против 40-55 у нефтяного дизельного топлива) и полным отсутствием сажи в выхлопе. Кстати, эфир вдвое дешевле солярки, но расход его вдвое больше [37].

Преимущества сжиженного газа: цены ниже, чем на бензин (но выше, чем на сжатый газ); возможно переоборудование практически любых бензиновых двигателей внутреннего сгорания; наличие дополнительной топливной системы; меньше токсичность ОГ. Недостатки: при температуре ниже 0°C (т.е. зимой) необходим запуск и прогрев на бензине; запасы ограничены; дополнительные расходы на установку и обслуживание.

Этанол (еще называется этиловым спиртом или хлебным спиртом) представляет собой альтернативный вид топлива, его можно смешивать с бензином для получения топлива с более высоким октановым числом и меньшим содержанием вредных веществ в выбросах, по сравнению с чистым бензином. Этанол производится за счет брожения зерновых продуктов таких как: кукуруза, ячмень или пшеница; и дистилляции. Также его можно производить из многих видов трав и деревьев, хотя здесь технология будет более сложной, в таком случае его называют биоэтанолом [38].

Технологий производства биотоплива несколько. Первая из них - это переработка сельскохозяйственных отходов в топливо. Сырьем, для этого процесса, могут служить куски древесины, солома и навоз. Производство именно такого топлива, получившее название SunDiesel, начала немецкая химическая компания Choren Industriens при поддержке концернов DaimlerChrysler и Volkswagen. Кроме того, биодизельное топливо «ССБ-нейтрально» по отношению к окружающей среде. Вторая - это добавление рапсового масла в дизельное топливо. Именно добавление, поскольку рапсовое масло в чистом виде как топливо не используется. Из-за более высокой вязкости (почти в 20 раз выше по сравнению с дизельным топливом) требуется другая топливная аппаратура и изменение камеры сгорания. В качестве топлива применяются сложные эфиры рапсового масла, добавляемые в количестве от 5 до 30% в дизельное топливо или используемые самостоятельно (биодизель). В ходе переработки масла в биодизель получают ряд дополнительных продуктов, пользующихся спросом (например, глицерин, сульфат калия) [39-46].

Преимущества биодизеля: меньше выбросы вредных веществ; запасы сырья могут возобновляться ежегодно, культура не требует особого ухода в процессе выращивания; в ходе переработки масла получают дополнительные продукты (глицерин, сульфат натрия). Недостатки: себестоимость производства выше, чем бензина и дизтоплива; требуются дополнительные площади сельскохозяйственных земель; эфиры рапсового масла обладают значительной коррозионной активностью; ниже мощность двигателя и выше расход горючего.

Третий вид биологического топлива - синтетическое горючее. Современные технологии переработки углеводов позволяют производить синтетическое дизельное топливо и синтетический бензин. В качестве сырья используются отходы деревообрабатывающей промышленности, сельского хозяйства и даже бытовой мусор. Первое в мире синтетическое дизельное топливо, в 2003-м году, разработала корпорация

DaimlerChrysler. Новое топливо, которое разработчики назвали BIOTROLL, производится из древесных отходов, а при его сгорании в атмосферу вообще не выбрасывается углекислый газ. Первая заправка, на которой можно пополнить баки новым топливом, уже функционирует в Штутгарте [40, 41].

Преимущества: можно получить требуемые характеристики топлива; в синтетическом дизтопливе отсутствует сера; выбросы вредных веществ ниже, чем при использовании «нефтяного» топлива; запасы сырья неограничены. Недостатки: высокие затраты энергии для производства горючего; необходимы значительные вложения средств, для создания предприятий по выпуску синтетического топлива и создание структуры накопления, поставки и подготовки сырья.

Водород. На данный момент существуют два вида применения водорода в автомобилях. Первый - это топливные элементы. Ещё один путь внедрения водорода на автотранспорте - сжигание его в ДВС. Такой подход используют BMW и Mazda (рисунок 1.4) [41, 42].

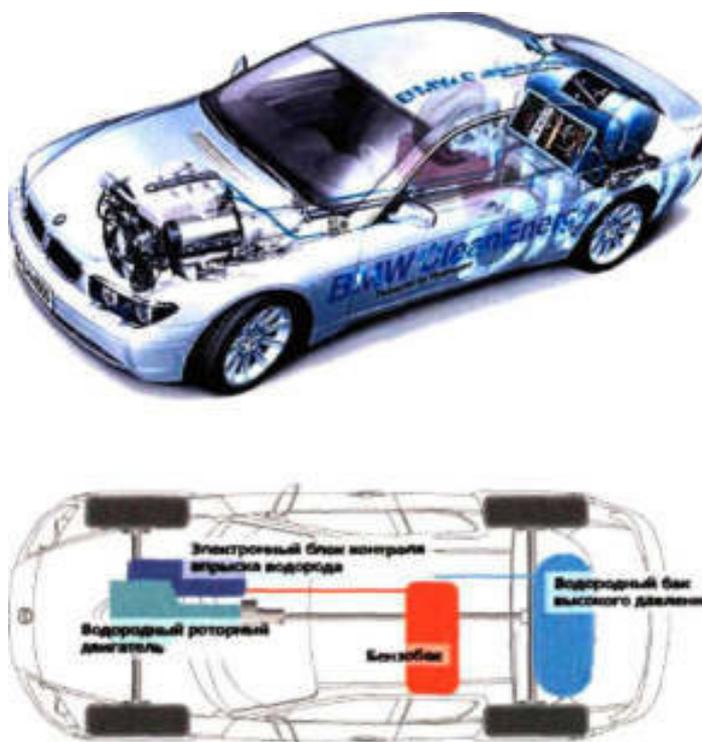


Рисунок 1.4 - Автомобиль BMW с двигателем на водороде

Производители BMW и Mazda предлагают сохранить в автомобиле возможность ездить на бензине. Кроме того, перевод на водород ДВС не только делает их экологически чистыми, но и повышает термический КПД. Дело в том, что водород обладает широким, по сравнению с бензином, диапазоном пропорций смешивания его с воздухом, при которых ещё возможен поджиг смеси. И сгорает водород полнее, даже вблизи стенок цилиндра, где в бензиновых ДВС остаётся несгоревшая рабочая смесь [47-49].

Одним из средств снижения токсичности ОГ является производство топлива, которое отвечает современным требованиям стандартов. В таблице 1.8 представлены требования международных стандартов по отдельным показателям дизельного топлива [1, 3, 10, 50-54].

Таблица 1.8 - Требования норм дизельного топлива

Показатель	ГОСТ 305-82	EN 590-99	Всемирная топливная хартия				
			EN590 - 2004	ЕВРО-0	ЕВРО - 1,2	ЕВРО-3,4	ЕВРО-4
Цетановое число, не менее	45,0	51,0	51,0	48,0	53,0	55,0	55,0
Содержание серы, мг/кг	5000	350	50	3000	300	30	5-10
Массовая доля ПАУ, %, не более	Не нормируется	11,0	11,0	Не норм.	5,0	2,0	2,0
Температура вспышки, °С, не менее	35-40	55	55	55	55	55	55

Из таблицы 1.8 видно, что ГОСТ 305-82 не отвечает требованиям Евро-0.

Доведение качества отечественных дизельных топлив до требований EN590 возможно только при комплексном внедрении на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) современных дорогостоящих технологий гидроочистки (гидрокрекинг и др.) и использовании присадок [1, 3, 27, 31].

На токсичность ОГ дизелей оказывают влияние режимы работы ДВС. Температурный фактор является определяющим в процессе образования оксидов азота в области малых и средних нагрузок, и лишь при больших цикловых подачах топлива рост выхода  $\text{NO}_x$  замедляется вследствие появления в камере сгорания объёмов, в которых практически отсутствует кислород [1, 27-30].

Увеличение частоты вращения до  $n=2000 \text{ мин}^{-1}$  приводит к снижению дымности ОГ вследствие улучшения смесеобразования, однако при  $n > 2000 \text{ мин}^{-1}$  дымность опять возрастает, что объясняется влиянием сокращения времени сгорания топлива. На образование  $\text{NO}_x$ , CO и CH частота вращения влияет незначительно.

Исследования авторов работ [1, 3, 10, 29, 30] установили, что в дизелях с камерой сгорания в поршне дымность ОГ на низких скоростных режимах возрастает в 1,5...2 раза по сравнению с номинальным режимом. Это объясняется тем, что при уменьшении частоты вращения ухудшается распыление и смешивание топлива с воздухом, и сажа, образующаяся в зонах камеры с переобогащенной смесью, оказывается в зонах с избытком кислорода слишком поздно, не успевая там окисляться. Поэтому подачу в диапазоне низких частот вращения необходимо ограничивать, то есть обеспечивать соответствующее корректирование скоростных характеристик топливоподачи.

В период разгона автомобиля с дизелем, особенно, если последний имеет турбонаддув, в результате кратковременного обогащения смеси значительно возрастает дымность ОГ, в то же время имеет место лишь относительно небольшое увеличение концентрации CO, CH и  $\text{NO}_x$ .

Угол опережения впрыскивания обуславливает значительное изменение длительности периода задержки воспламенения и доли топлива, впрыснутого за этот период, что сказывается на продолжительности диффузионного сгорания. При его уменьшении, в результате снижения температуры сгорания, образование  $\text{NO}_x$  замедляется [1, 10, 19, 20, 34].

В ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии разработан сигнализатор загрузки двигателя, который позволяет оптимизировать режим работы двигателя [55], в результате чего снижается токсичность ОГ.

Интенсивность дымления и токсичность ОГ зависят от технического состояния и регулировок ТНВД. Недопустимы подтекание топлива из распылителя, неправильная регулировка давления начала впрыска, зависание иглы распылителя и т.п. Большое значение имеет тепловое состояние распылителя. Его перегрев выше  $180\text{--}200^\circ\text{C}$  приводит к закоксуыванию, нарушению характеристик впрыскивания, ухудшению идентичности подачи топлива через отдельные распыливающие отверстия [1, 10, 19, 56, 57].

При засорении воздухоочистителя или потере герметичности клапанов токсичность ОГ может возрасти в результате снижения наполнения цилиндров и компрессии [28-30].

Зазоры в трансмиссии ТС приводят также к перерасходу топлива, что влияет на повышение токсичности ОГ, поэтому в настоящее время конструируют саморегулируемые зацепления зубчатых передач [1, 10, 34].

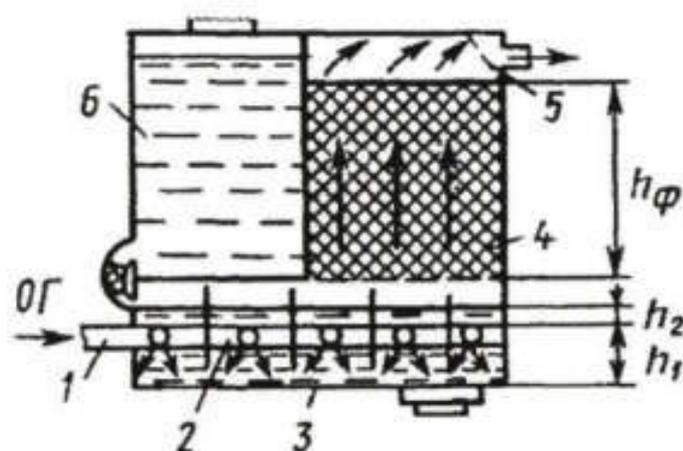
Также актуальны системы автоматической подкачки шин для возможности регулирования давления, что позволяет снизить токсичность ОГ.

Исследователями выполнение норм ЕВРО связывается с применением каталитических нейтрализаторов отработавших газов для всех типов двигателей внутреннего сгорания. Проведенный анализ состояния работ по нейтрализации отработавших газов ДВС говорит о том, что к числу перспективных путей ее развития далее не могут быть отнесены следующие: пламенная нейтрализация (ПН), жидкостная нейтрализация (ЖН),

термокаталитическая нейтрализация (ТКН) и ряд других, разработке которых были посвящены исследования, начиная с 1965... 1966 годов [29, 30, 58].

Пламенная нейтрализация ОГ неконкурентоспособна ввиду того, что требует дополнительного расхода топлива, затрат энергии на поддержание пламени, подачу воздуха. Кроме этого ПН имеет низкую эффективность очистки ОГ от  $\text{NO}_x$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ,  $\text{CO}$  и сажи, высокую пожароопасность, необходимость системы автоматики, связывающей режимы эксплуатации с осуществлением дополнительной подачи топлива и воздуха [29, 30, 58].

В ЖН (рисунок 1.5) отработавшие газы поступают по трубе 1 и через коллектор 2 попадают в бак 3, где вступают в реакцию с рабочей жидкостью. Очищенные газы проходят через фильтр 4, сепаратор 5 и выбрасываются в атмосферу. По мере испарения жидкость доливают в рабочий бак из дополнительного бака 6.



1 - труба; 2 - коллектор; 3 - бак; 4 - фильтр; 5 - сепаратор; 6 - дополнительный бак

Рисунок 1.5 — Схема жидкостного нейтрализатора

Жидкостная нейтрализация ОГ не существует ни в одной стране мира. Её используют как дополнительную с другими видами нейтрализации только для снижения температуры ОГ на выходе из системы выпуска. К числу отрицательных факторов ЖН относятся увеличение габаритов техники,

существование паров химических реагентов, испаряемых ОГ, большой расход жидкости и реагентов, низкий показатель всесезонности эксплуатации ввиду замерзания реагентов на стоянках в зимнее время, низкая эффективность снижения уровней содержания основных нормируемых токсичных веществ в ОГ. Таким образом, системы ЖН неконкурентоспособны по сравнению с другими системами нейтрализации ОГ [29, 30, 58].

Термокаталитическая нейтрализация ОГ разработана достаточно хорошо, зарекомендовала себя высокой степенью очистки, особенно от окислов азота, и продолжает успешно применяться в горнодобывающей промышленности. С другой стороны ТКН имеют большие габариты, материалоёмки, не могут быть размещены вместо глушителей, требуют дополнительного расхода энергии.

Расход топлива двигателем с ТКН увеличивается на 15%. Установка ТКН на транспортных средствах требует надежной системы автоматики для обеспечения согласования системы подогрева ОГ с режимами двигателя [1, 3, 19, 29, 30, 58].

Сажевые фильтры (СФ) становятся очень актуальны, так как все существующие катализаторы ОГ эффективны непродолжительное время и не на всех режимах, из-за осаждения сажевых частиц на их химической поверхности, что выводит катализаторы из строя [59]. Сажевые фильтры работают по принципу диффузионной и инерционной задержки частиц с помощью фильтрующего материала [1,3, 10, 19, 20]. Наиболее распространены фильтры из керамических многоканальных монолитов (рисунок 1.6) или непрерывных волокон и из металлической сетки.

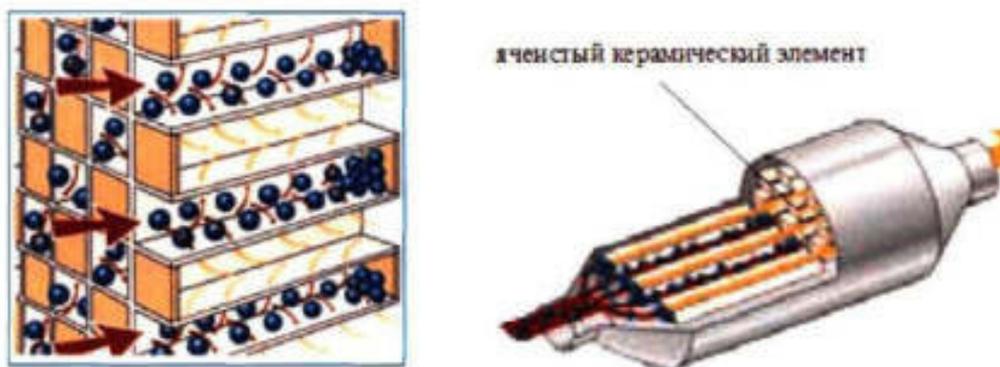


Рисунок 1.6 - Сажевый фильтр

Существует множество методов регенерации (восстановления работоспособности) фильтров, подразделяемых на пассивные и активные. Пассивные системы фильтрации предусматривают катализатор, понижающий температуру выжигания сажи. Активные фильтрующие системы включают в себя электрические нагреватели или топливные дожигатели частиц [29, 59]. Активные фильтрующие системы могут быть разделены по двум принципам: очищаемый от частиц поток газов сначала нагревается, потом проходит фильтрацию, или нагревается сам фильтр, через который проходят ОГ.

Степень выжигания сажи зависит от температуры фильтра. При типичной для ОГ дизеля температуре (около  $300^{\circ}\text{C}$ ), она невысока. Следовательно, облегчить регенерацию фильтра можно при повышении температуры ОГ либо при использовании каталитических покрытий фильтрующего элемента или присадок к топливу. Нанесение каталитических покрытий - дорогостоящая технология, каталитические присадки не обеспечивают эффективного дожигания сажи.

Поэтому наиболее широкое распространение получил электрически нагреваемые сажевые фильтры (рисунок 1.7). Данные фильтры не требуют регенерации фильтрующей поверхности, имеют малое гидродинамическое сопротивление, и, благодаря блоку управления, автоматически обеспечивают необходимую температуру для выжигания сажи, но работают не достаточно эффективно (степень очистки 60-70%) [29, 30, 58, 59].

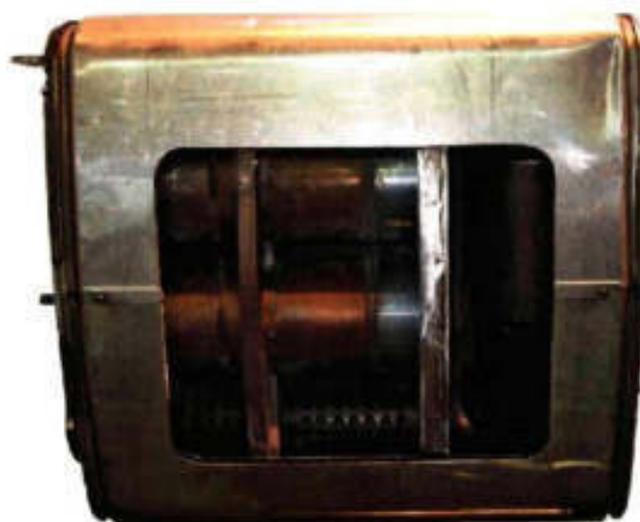


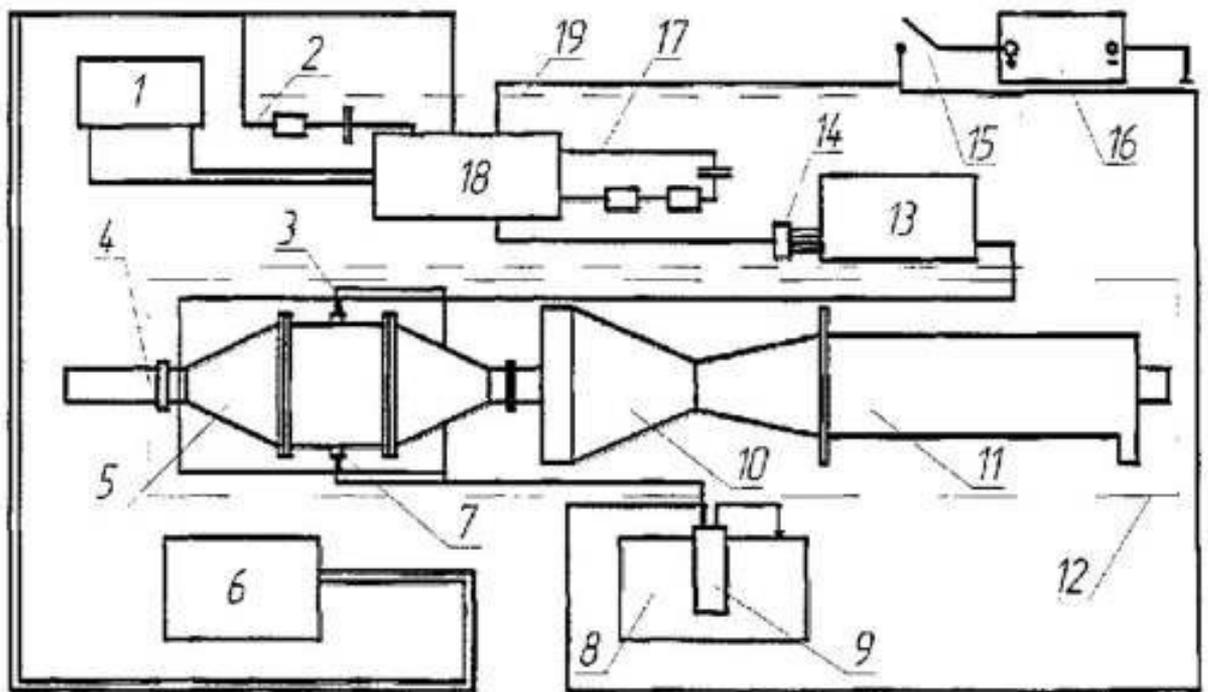
Рисунок 1.7 - Сажевый фильтр с непрерывной регенерацией, встроенный в глушитель

Современные комплексные системы очистки ОГ для дизелей состоят из каталитических, жидкостных нейтрализаторов и сажевых фильтров [1,3, 19].

Система DRNR одновременно обезвреживает и канцерогенные частицы сажи, и вредные окислы азота. DRNR показала снижение содержания сажи и  $\text{NO}_x$  на 80% по сравнению с действующими нормами, но применима лишь для дизелей последнего поколения, работающих с системой "Коммон рейл" [28, 29, 30, 58].

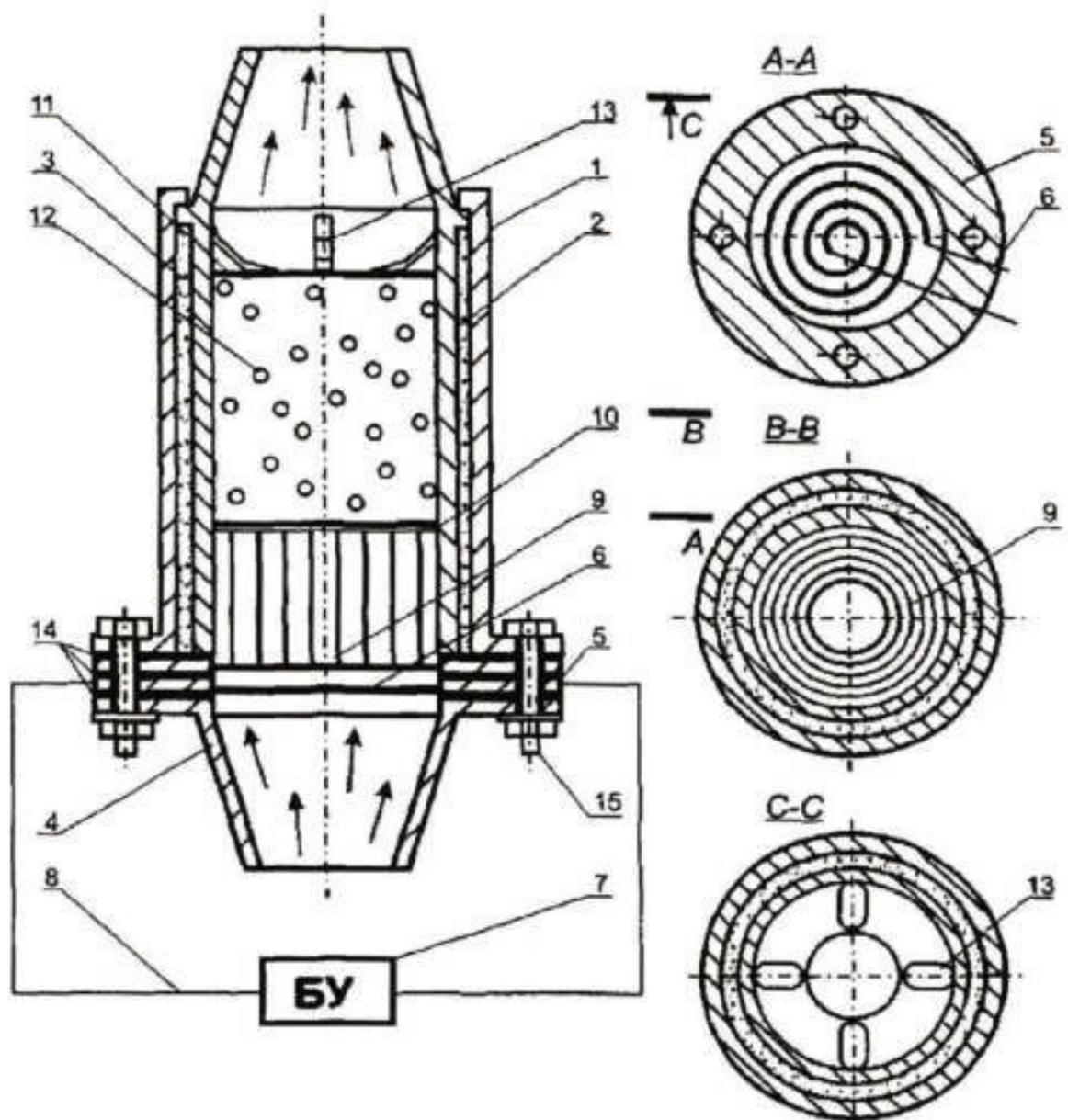
Основным недостатком средств очистки ОГ в выпускной системе двигателей от токсичных компонентов является то, что каждое средство снижает содержание конкретного вредного вещества (С, или СО, или  $\text{NO}_x$ ), за исключением дорогостоящих многокомпонентных нейтрализаторов каталитического типа.

Поэтому в настоящее время нашли широкое применение комбинированные устройства снижения токсичности ОГ, которые способны очищать ОГ сразу от нескольких вредных веществ (рисунки 1.8, 1.9) [1,3, 19, 60].



1 - датчик положения коленчатого вала; 2, 17 - времязадающие цепи; 3 - металлические трубки для подачи нейтрализующего раствора; 4 - выхлопной коллектор; 5 - аэрозольная камера; 6 - датчик положения регулятора; 7 - форсунки; 8 - бак с нейтрализующим раствором; 9 - жидкостный насос; 10 - эжектор; 11 - центробежный каплеуловитель; 12 - жидкостный нейтрализатор; 13 - блок ключей; 14 - резисторная сборка; 15 - ключ; 16 - источник тока; 18 - интегральный блок таймер; 19 — блок управления

Рисунок 1.8 - Схема устройства для очистки ОГ дизелей



1, 2 - соответственно внешние и внутренние стенки; 3 - слой теплоизолятора; 4 - диффузор; 5 - кольцо; 6 - электрическая спираль; 7 - блок управления; 8 - провода; 9 - блок concentрических экранов; 10, 11 - решетки; 12 - катализатор; 13 - упругий элемент; 14 - электроизоляционные кольца; 15 - болтовые соединения

Рисунок 1.9 - Термокаталитический нейтрализатор ОГ дизеля

Существующие конструкции комбинированных устройств очистки ОГ от токсичных компонентов имеют ряд недостатков: недостаточная эффективность; большие потери мощности; сложность конструкции; металлоём-

кие; отсутствие очистки от тяжёлых фракций ОГ; незначительный срок службы. Для термokatалитического нейтрализатора (см. рисунок 1.10) степень очистки составляет: CO - 50...60%, NO<sub>x</sub> - 30...40%, сажа - 30...40%.

На основе анализа способов и средств снижения токсичности ОГ дизельных ДВС разработана схема их классификации (рисунок 1.10).

Проведённый анализ позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным и экономически целесообразным средством снижения токсичных выбросов дизелей является установка в выпускной системе ДВС устройства очистки ОГ, что позволяет при низких материальных затратах получить малотоксичные отработавшие газы.

Анализ существующих средств очистки ОГ в выпускной системе ДВС позволяет сделать вывод, что устройства должны состоять из каталитического нейтрализатора, сажевого фильтра, то есть быть комбинированными. Для повышения эффективности работы устройства очищенные ОГ необходимо направить на повторный цикл очистки. Для повышения эффективности работы каталитического нейтрализатора ОГ устройства необходимо наличие фильтра-отстойника, так как конденсат и несгоревшее топливо, содержащиеся в ОГ, способствуют интенсивному загрязнению активной поверхности катализатора.

#### 1.5 Выводы. Цель и задачи исследования

Анализ способов и средств снижения токсичных выбросов дизелей мобильной сельскохозяйственной техники показывает, что:

1. Загрязнение атмосферы вредными веществами, которые выделяются с отработавшими газами при работе ДВС, достигло катастрофических масштабов. Доля мобильной сельскохозяйственной техники, оснащенной дизельными ДВС, в загрязнении воздушного бассейна страны токсичными компонентами ОГ составляет около 25%.

2. В результате анализа установлено, что самым эффективным способом снижения токсичности и дымности дизелей является физико-химическая обработка ОГ в выпускной системе ДВС.

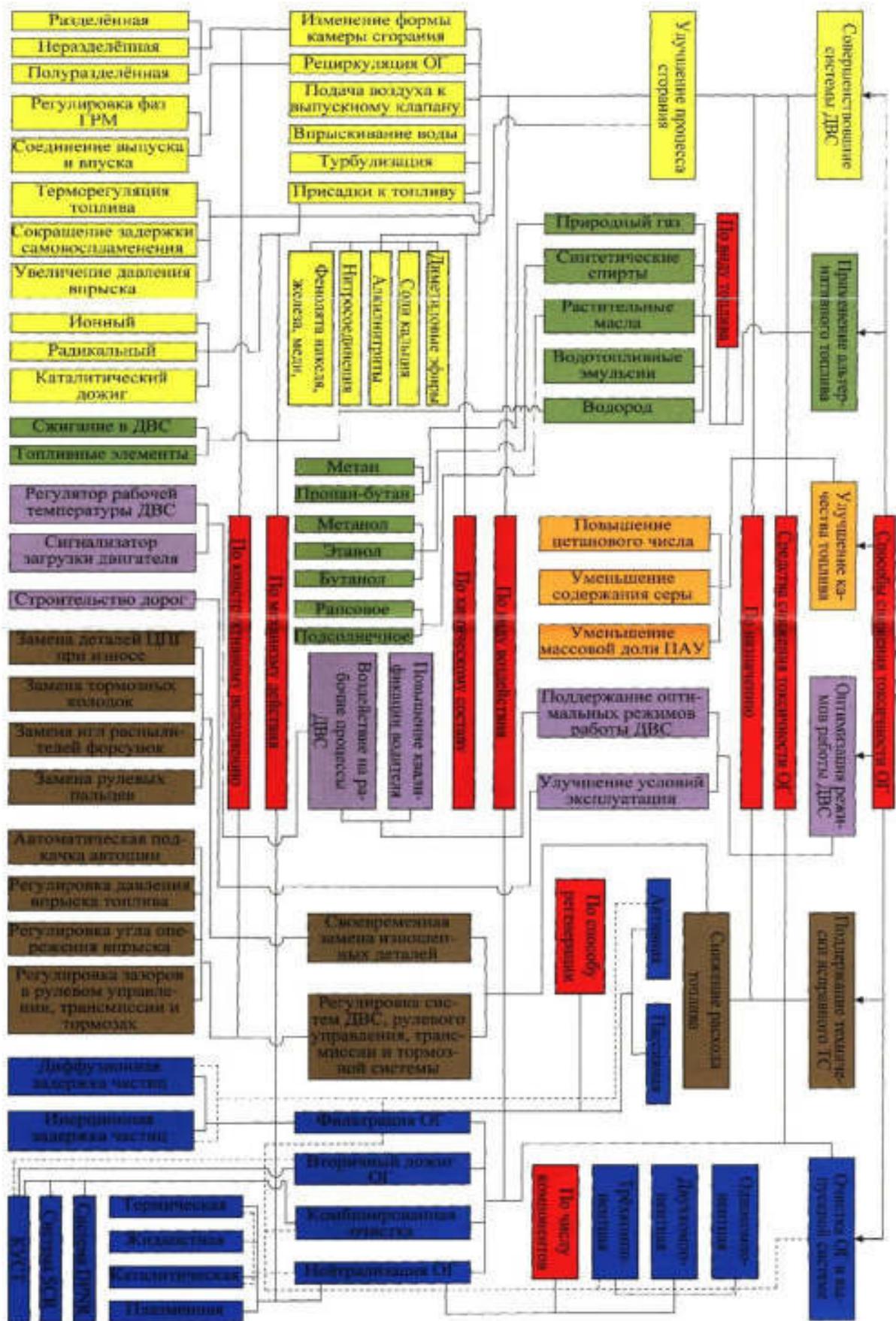


Рисунок 1.10 – Схема классификации способов и средств снижения токсичности ОГ двигателей

3. Используемые сегодня нейтрализаторы и сажевые фильтры дизелей имеют недостатки: сложная конструкция, большие потери мощности, снижение эффективности очистки в процессе наработки и высокая стоимость.

4. Наиболее перспективным направлением снижения выбросов токсичных веществ является разработка конструкции комбинированного устройства для очистки ОГ, которое сочетает функции катализатора и электрического сажевого фильтра

Целью данной работы является снижение токсичности отработавших газов дизелей, используемых в сельском хозяйстве.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать и обосновать конструктивно-технологическую схему комбинированного устройства для очистки отработавших газов дизелей;
- разработать математическую модель описания процессов, протекающих в устройстве при очистке отработавших газов;
- провести экспериментальные исследования и определить зависимости удельных показателей эффективности устройства;
- провести испытания устройства очистки отработавших газов в производственных условиях;
- провести оценку экономической эффективности устройства снижения токсичности и установить целесообразность его применения.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ОТ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ**

### **2.1 Анализ теоретических исследований очистки отработавших газов дизелей**

Обеспечение экологической безопасности дизельных ДВС за счёт очистки ОГ в выпускной системе посвятили такие учёные, как: Звонов В.А., Смайлис В.И., Лиханов В.А., Сайкин А.М., Тришкин И.Б., Николаенко А.В., Патрахальцев Н.Н., Цыщын В.И., Уханов А.П., Швыдкий В.С., Стрельников В.А., Истомин С.В., Жегалин О.П., Петров А.А., Олейник Д.О. и другие. Работы этих учёных направлены на изучение процессов образования токсичных веществ в цилиндрах двигателей, разработке способов и средств снижения выбросов загрязняющих веществ с ОГ, изучению и математическому описанию процессов, протекающих в разработанных средствах, разработке методик определения концентрации токсичных веществ, определению критериев эффективной работы средств очистки ОГ и обобщению результатов исследований по содержанию загрязняющих веществ в ОГ дизельных двигателей.

На основании анализа работ [1, 3, 10, 19, 20, 28-30] установлено, что современное средство очистки ОГ дизелей в выпускной системе должно состоять из нескольких ступеней очистки: каталитическая нейтрализация токсичных компонентов, фильтрация сажи, очистка ОГ от тяжёлых фракций потока. Оптимизация конструктивных параметров таких устройств должна проводиться на основании математического моделирования процессов, протекающих в них.

При анализе теоретических исследований были изучены работы [28, 5763], в которых поток газов рассматривается как движение капель и твёрдых частиц топлива в закрученных струях. Здесь используются методы двумерного моделирования движения частиц, имеющих форму шара и направляемых в зону рециркуляции. Изучены процессы разделения частиц

сажи в закрученных струях циклонов, учитывая отскок частиц от стенок циклона, из каких фракций состоят сами частицы [61]. Процессы выгорания сажи при выпуске и в устройстве очистки изучены недостаточно, что связано с относительно высокой скоростью потока ОГ.

В работах [1, 3, 10, 19, 20] представлены результаты исследований термического окисления токсичных компонентов ОГ и эффективность фильтрации сажевых частиц в нейтрализаторе, в работе [3] устройстве очистки циклонного типа для всех нагрузочных режимов дизеля.

Исследования [1, 3, 10, 19, 20, 66-68] направлены на изучение и определение математических моделей сопротивления трения потоку ОГ в устройствах очистки при установившемся режиме [1, 3, 19, 69-71].

В работах [1, 10, 19, 72, 73] проведены исследования электротермокаталитических нейтрализаторов (ЭТКН) токсичных компонентов ОГ, в которых отсутствует закрутка потока газов, что приводит к увеличению падения давления газов в устройстве очистки. В ЭТКН используются катализаторы на основе благородных металлов, что приводит к увеличению стоимости систем очистки ОГ. В этих работах также исследуется установившийся режим потока газов.

Одной из важнейшей части исследований является оптимизация параметров разрабатываемых устройств очистки ОГ на основании критериев эффективности. В исследованиях [68-71] в качестве критериев используют показатели эффективности очистки потока газов, а также показатели степени очистки, которые могут определяться по одной из токсичных составляющих или по нескольким.

Анализ теоретических исследований в области изучения современных средств очистки ОГ в выпускной системе дизельных ДВС показал, что: комбинация ступеней очистки в устройствах не позволяет получить максимального эффекта снижения токсичности ОГ; закручивание потока газов является чрезвычайно активным средством воздействия на рабочий процесс в нейтрализаторе в целом, высокофорсированным способом

совершенствования теплотехнических процессов, но приводит к значительным потерям мощности дизеля, за счёт высокого газодинамического сопротивления, математические модели описывают в основном стационарные режимы потока газов в устройствах очистки, кроме работы [72], где описывается динамический режим потока газов; при выборе критериев оптимизации параметров устройств учитывается только положительный результат (качество очистки), а отрицательный (потери давления в устройстве, приводящие к потере мощности) не учитываются, что может вызвать сомнения при установлении эффективности работы устройства.

При определении степени очистки ОГ устройством по нескольким компонентам необходимо учитывать вредное воздействие каждого компонента, оказываемого на окружающую среду, то есть проводить ранжирование по весовому коэффициенту.

Также можно добавить, что при математическом моделировании процессов в устройствах очистки ОГ учитывают или физико-химические, или газодинамические, или тепловые процессы, или объединяют их в различных вариантах, но общей модели, описывающей каждый процесс в отдельности нет.

Поэтому целью теоретических исследований является получение математической модели описания процессов, протекающих в устройстве очистки ОГ и оценка эффективности его работы.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести анализ кинетики химических реакций, протекающих в устройстве снижения токсичности;
  - обосновать конструкцию предлагаемого устройства;
  - определить общий коэффициент газодинамического сопротивления устройства.
- получить теоретическую математическую модель описания процессов, протекающих в предлагаемом устройстве;

- определить степень очистки ОГ от токсичных компонентов предлагаемым устройством;

- определить степень изменения давления ОГ в выхлопной системе при использовании устройства;

- определить эффективность работы устройства очистки.

## 2.2 Описание комбинированного устройства снижения токсичности отработавших газов дизеля

На основании изучения последних достижений в области конструирования средств очистки ОГ, опубликованных в научных изданиях, автором разработана конструкция комбинированного устройства снижения токсичности ОГ дизельных двигателей, основанная на вторичном дожиге ОГ, представленная на рисунке 2.1 (приложение А) [53].

Вторичный дожиг заключается в направлении части потока ОГ, прошедшего очистку в устройстве, на повторную.

Устройство содержит корпус, в котором размещён слой катализатора (реактор) 1, состоящий из верхней 2 и нижней 3 частей, соединённых болтами. Нижняя часть корпуса 3 соединена через патрубок 4, в котором установлен эжектор 5, с системой выпуска ДВС.

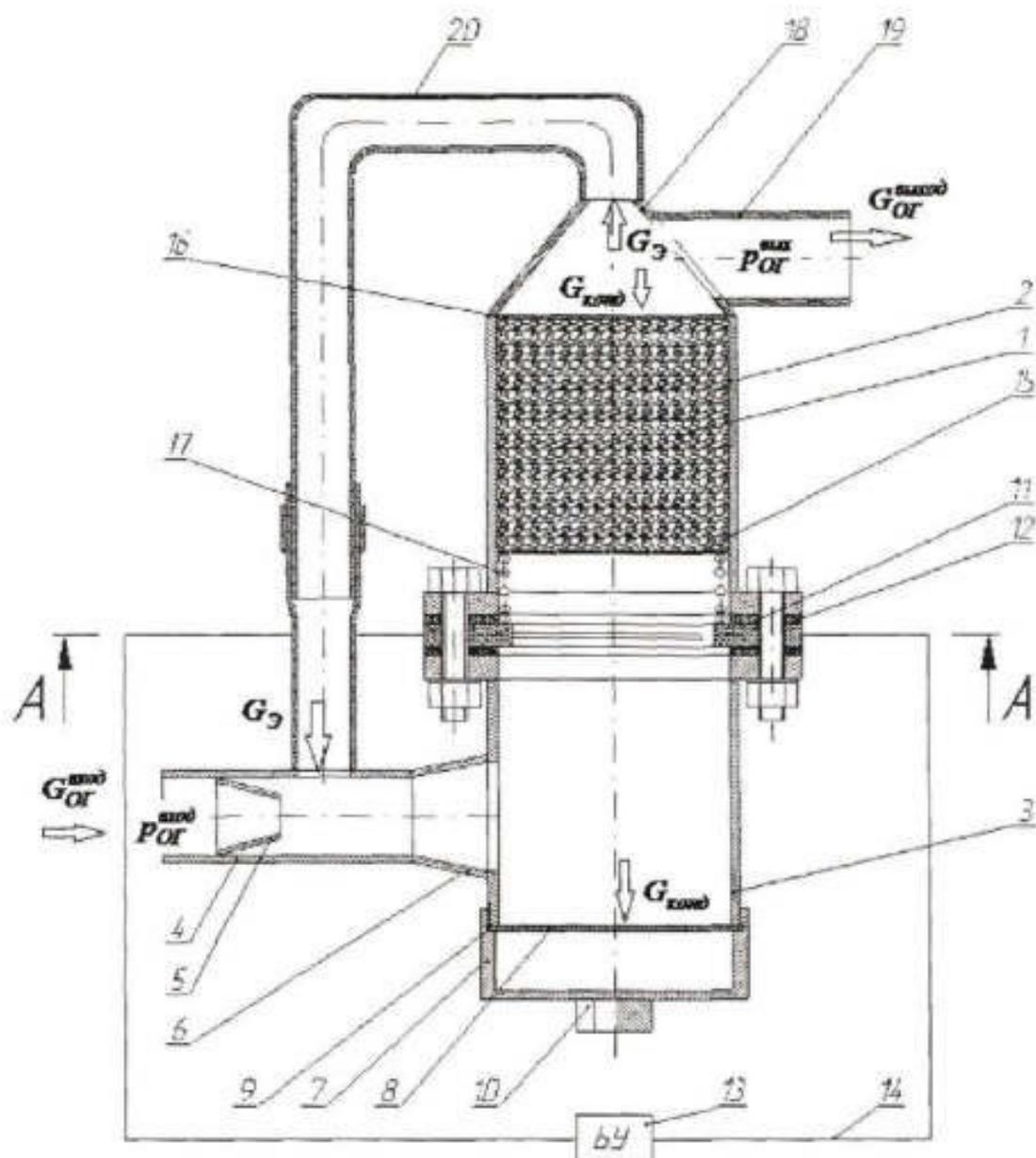
На входе в нижнюю часть корпуса установлен диффузор 6, который имеет форму усечённого конуса. На нижнюю часть корпуса навинчивается фильтр - отстойник 7 с металлической сеткой 8, который герметизируется прокладкой 9. На днище фильтра-отстойника имеется гайка 10 под ключ, для удобства его демонтажа.

Между верхней и нижней частями корпуса установлена электрическая спираль 11 (рисунок 2.2) в керамическом блоке, который установлен через прокладки 12. Спираль соединена проводами 14 с блоком управления 13.

Слой катализатора 1 расположен между входной 15 и выходной 16 решетками. Между входной решеткой катализатора и корпусом электрической спирали установлен компенсирующий элемент 17 в виде пружины. Верхняя

1 и нижняя 2 части корпуса соединены болтовым соединением. В верхней части корпуса находится конфузор 18, он имеет два патрубка, один из которых 19, связан с атмосферой, а другой 20 - с полостью входного патрубка 4.

Устройство работает следующим образом. При работе двигателя ОГ по выпускной системе поступают в патрубок 4 и, при прохождении через эжектор 5 ускоряются, тем самым создавая разрежение в полости конфузора 18.



1 - слой катализатора (реактор); 2 - верхняя часть корпуса; 3 - нижняя часть корпуса; 4 - патрубок; 5 - эжектор; 6 - диффузор; 7 - фильтр-отстойник; 8 - металлическая сетка; 9 - прокладка; 10 - гайка; 11 - электрическая спираль; 12 - уплотнительные прокладки; 13 - блок управления; 14 – электрические провода; 15 - входная решётка; 16 - выходная решётка; 17 - биметаллическая цилиндрическая пружина; 18 - конфузор; 19 - выходной патрубок; 20 - Г-образный патрубок

Рисунок 2.1 - Общий вид КУСТ дизеля

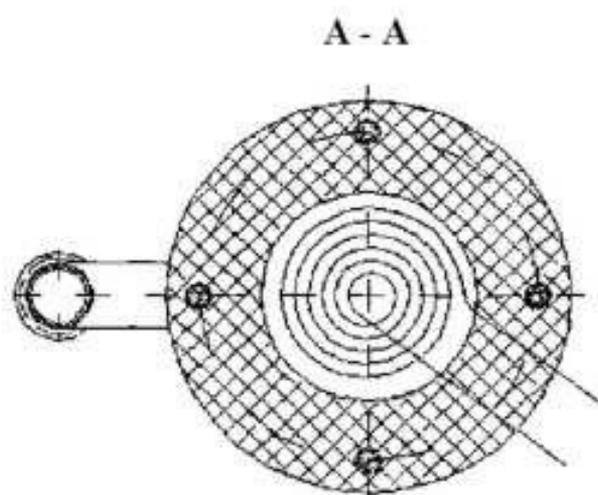


Рисунок 2.2 - Электрическая спираль

Затем газы поступают в диффузор 6, в котором распределяются по всему пространству нижней части корпуса 3, благодаря его конусообразной конструкции. Тяжелые фракции ОГ и конденсат оседают в фильтре-отстойнике 7. Поток газов проходит сквозь электрическую спираль 11, которая позволяет повысить температуру ОГ, способствуя тем самым дожиганию сажевых частиц. Очищенные от сажи ОГ проникают сквозь входную решетку 15 в слой катализатора 1, в котором происходит окисление  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$  до конечных безопасных по токсичности компонентов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), и селективное восстановление  $\text{NO}_x$  до  $\text{N}_2$ . Очищенные ОГ направляются сквозь выходную решетку 16 в конфузор 18. Благодаря его конусообразной форме и разрежения, создаваемого в его полости, часть ОГ поступает в Г-

образный патрубок 20 и попадает во входной патрубок 4, где смешивается с вновь поступившими ОГ и проходит вторичный цикл очистки. Остальная часть ОГ поступает через патрубок 19 в атмосферу.

В результате теплового расширения объем гранул катализатора 1 увеличивается, смещая входную решетку в направлении противоположном движению потока ОГ. При этом пружина 17, выполненная из биметаллического материала, реагируя на повышение температуры, не допускает появления свободного объема в зоне слоя катализатора 1, и одновременно, не позволяя входной решетке чрезмерно сжать гранулы, во избежание их спекания и разрушения.

Использование КУСТ позволяет: повысить эффективность очистки отработавших газов за счет вторичного дожига очищенных ОГ; добиться за счёт фильтра-отстойника увеличения срока эффективной работы катализатора, который не может эффективно работать при осаждении сажевых частиц на гранулах; предотвратить за счёт цилиндрической пружины перекосы входной решетки слоя катализатора, вследствие большой площади контакта с поверхностью входной решетки, снизить металлоемкость конструкции за счёт использования тонкостенного металла [34].

### 2.3 Анализ химических реакций, протекающих в КУСТ

Химические реакции, происходящие в комбинированном устройстве снижения токсичности отработавших газов идентичны для аналогичных устройств, представленных в работах [1, 10, 19, 20].

В устройстве возможно протекание реакций, которые приведены в таблице 2.1 [1, 10, 19,20, 45].

Таблица 2.1 - Химические реакции, протекающие в КУСТ

Реакция	$\Delta H_{298}^{\circ}$ кДж/моль	$G_{298}^{\circ}$ кДж/моль	$G_{573}^{\circ}$ кДж/моль	$k_p(573)$
$CO + 1/2O_2 = CO_2$	-282,4	-257,3	-233,9	$2,5 \cdot 10^{21}$
$NO = 1/2N_2 + 1/2O_2$	-90,4	-84,1	-78,2	$1,4 \cdot 10^7$
$C + 2NO = CO_2 + N_2$	-373,6	-341,8	-312,5	$3,5 \cdot 10^{28}$
$CH_4 + 4NO = CO_2 + 2H_2O + 2N_2$	-1164,0	-1149,0	-1134,0	-
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	-801,2	-800,8	-800,4	-
$C + O_2 = CO_2$	392,9	-394,6	-395,8	$1,6 \cdot 10^{36}$
$NO_2 = 1/2N_2 + O_2$	-33,5	-51,5	-68,0	$1,7 \cdot 10^6$
$2CO + NO_2 = 2CO_2 + 1/2N_2$	-599,1	-568,2	-593,3	-

В результате реакций (таблица 2.1), протекающих в устройстве, происходит окисление оксидов углерода (II) и углеводородов до безопасных по токсичности оксидов углерода (IV) и воды, и восстановление оксидов азота до N<sub>2</sub>.

Рассмотренные в таблице 2.1 реакции являются экзотермическими вследствие первого закона термодинамики [1, 10, 19]:

$$Q_p = -\Delta H,$$

где  $Q_p$  - теплота, выделяемая при реакции, Дж/моль;

$\Delta H$  - тепловой эффект реакции, Дж/моль.

Тепловой эффект в результате реакции определяется по формуле [1, 19]:

$$\frac{d \ln k_p}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}$$

где  $k_p$  - константа химического равновесия;

$T$  - температура реакции, К;

$R$  - универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К.

Константа равновесия является функцией температуры.

Согласно закону Аррениуса рост скорости протекающих реакций, вызванный повышением температуры определяется:

$$k_V(T) = k_{V0} \cdot e^{-E/RT}, \quad (2.1)$$

где  $k_V$  - константа скорости реакции в единице объёма;

$k_{V0}$  - исходная константа скорости реакции в единице объёма;

$E$  - энергия активации, Дж.

Установлено [66], что высокая скорость образования нетоксичных соединений достигается при температурах до 1000°C, а при невысоких температурах (300-400°C) скорость этих процессов невелика. Скорость химических реакций определяет нагрузку на катализатор и представляет собой отношение объёма (приведённого к нормальным условиям) газовой смеси, прошедшей через катализатор за 1 ч., к объёму катализатора [1, 19, 20].

При относительно температурах 300-400°C скорость процесса на катализаторе зависит от концентрации реагирующих между собой компонентов [1]. Процесс окисления оксида углерода описывается уравнением:

$$d(CO)/dt = -k_1(CO)^{0,7},$$

где  $k_1$  - константа реакций окисления углерода.

Скорость окисления углеводородов описывается уравнением [1]:

$$d(C_nH_m)/dt = -k_2(C_nH_m) \cdot (O_2)^{0,2},$$

где  $k_2$  - константа реакций окисления углеводородов.

Энергия активации  $E$  и логарифм исходной константы скорости реакции  $\ln k_{V0}$  компонентов приведены в таблице 2.2 [1, 19, 36].

Таблица 2.2 - Константы реакции окисления

Компонент ОГ	$E$ , ккал/моль	$\ln k_{10}$	Интервал температур, °C
CO	-	-	200-550
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	27,6	6,25	140-240
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	26,3	4,05	175-300
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	26,2	1,68	220-340
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	24,8	2,02	100-300

Анализ таблицы 2.2 показывает, что скорость реакции на активной поверхности катализатора при температурах 200-550°C совпадает со скоростью химического превращения, так как энергия активации и логарифм исходной константы скорости реакции приблизительно равны [1, 66].

Скорость реакции с повышением температуры растёт по экспоненте. Скорость химического превращения растёт, что обусловлено ускорением процессов массопереноса, до тех пор, пока этот процесс не перейдёт в область внешней диффузии, когда постоянная скорости реакции стремится к бесконечности и степень превращения равна степени массопередачи [1, 56, 57].

Анализ химических реакций, протекающих в комбинированном устройстве снижения токсичности отработавших газов дизелей, показал, что для того, чтобы обеспечить максимальную скорость процесса очистки в катализаторе, необходимо повысить температуру, за счёт дополнительного подвода теплоты.

#### 2.4 Газодинамические процессы, протекающие в КУСТ

Анализ экспериментальных исследований [48, 59] позволяет установить, что определяющим фактором оптимизации конструкции является максимальное снижение газодинамического сопротивления в

устройстве, что позволяет снизить потери давления в выпускной системе ДВС.

Чрезмерное увеличение противодавления на выпуске ОГ ведёт к повышению давления и коэффициента остаточных газов  $\gamma$  [30]:

$$\gamma = \frac{1}{\eta_v \cdot (\varepsilon - 1)} \cdot \frac{p_r \cdot T_0}{p_0 \cdot T_r}$$

где  $p_r$  - давление остаточных газов, Па;

$p_0$  - давление свежего заряда на впуске, Па;

$T_r$  - температура остаточных газов, К;

$T_0$  - температура свежего заряда на впуске, К;

$\varepsilon$  - степень сжатия;

$\eta_v$  - коэффициент наполнения цилиндров ДВС.

При увеличении коэффициента остаточных газов ухудшается процесс смесеобразования и сгорания. В результате ухудшаются мощностью и топливно-экономические показатели, так как при неполном сгорании топлива будет выделяться меньшее количество теплоты, то есть снижается коэффициент полезного действия ДВС и увеличивается содержание токсичных компонентов в отработавших газах [1].

#### 2.4.1 Обоснование геометрических параметров входной части КУСТ

Потери давления при расширении сечения, даже при равномерном поле скоростей, очень велики и тем больше, чем больше степень расширения потока [1, 69]. Для плавного перехода от меньшего сечения трубы к большему с минимальными потерями полного давления необходим диффузор, который представляет собой плавно расширяющийся участок (рисунок 2.3) [1].

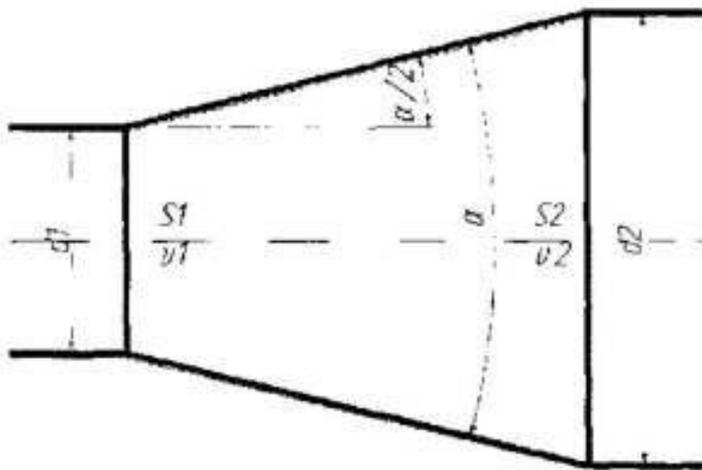


Рисунок 2.3 - Геометрические параметры диффузора

При течении газа в диффузоре происходит снижение скорости потока. Переход в нём ламинарного движения в турбулентное происходит при значительно меньших числах Рейнольдса, чем в цилиндрической трубе. В диффузоре происходит отрыв потока газов от стенки и вихреобразование (расширение). Интенсивность этих явлений возрастает с увеличением угла расширения диффузора  $\alpha$ . Потери давления в диффузоре определяются по формуле [1,71]:

$$\Delta p_{\text{диф}} = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{расш}} = \xi_{\text{диф}} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

где  $\Delta p_{\text{тр}}$  - потери давления на трение ОГ о стенки, Па;

$\Delta p_{\text{расш}}$  - потери давления на расширение потока ОГ (вихреобразование), Па.

$\xi_{\text{диф}}$  - коэффициент газодинамического сопротивления диффузора.

Коэффициент газодинамического сопротивления диффузора складывается из коэффициента сопротивления трения и коэффициента сопротивления расширения диффузора и представляет собой отношение потерь давления к скоростному давлению в узком сечении [1, 72]:

$$\xi_{\text{диф}} = \xi_{\text{тр}} + \xi_{\text{расш}} \quad (2.2)$$

где  $\xi_{\text{тр}}$  - коэффициент сопротивления трения диффузора;

$\xi_{\text{расш}}$  - коэффициент сопротивления расширения диффузора.

Коэффициент сопротивления трения диффузора определяется по формуле [73]:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_{\text{диф}}}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_{\text{диф}}^2}\right), \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент сопротивления трения единицы длины диффузора, определяется в зависимости от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок;

$\alpha_{\text{диф}}$  - угол расширения диффузора, град.;

$n_{\text{диф}}$  - степень расширения диффузора.

Степень расширения диффузора определяется по формуле:

$$n_{\text{диф}} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2},$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - площадь поперечного сечения диффузора на входе и выходе соответственно.

$d_1$  и  $d_2$  - диаметр диффузора на входе и выходе соответственно.

Коэффициент сопротивления расширения диффузора определяется [72]:

$$\xi_{\text{расш}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \cdot k, \quad (2.4)$$

где  $k$  - коэффициент смягчения, при  $\alpha = 5 \dots 20^\circ$ ,  $k = \sin \alpha$  [51].

Подставив выражения 2.3 и 2.4 в формулу 2.2, получим:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_{\text{диф}}}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_{\text{диф}}^2}\right) + \sin \alpha_{\text{диф}} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_{\text{диф}}}\right)^2 \quad (2.5)$$

Анализ формулы 2.5 показывает, что коэффициент газодинамического сопротивления диффузора  $\xi_{\text{диф}}$  зависит коэффициента сопротивления трения  $\lambda$  и угла расширения диффузора  $\alpha_{\text{диф}}$  (рисунок 2.4) [1, 55].

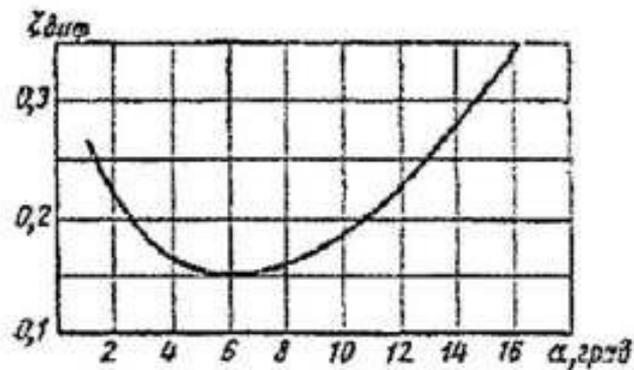


Рисунок 2.4 - Зависимость коэффициента газодинамического сопротивления от угла расширения диффузора

Из рисунка 2.4 видно, что при углах расширения меньших оптимального сопротивление диффузора высокое, вследствие большого коэффициента трения, а при углах больших оптимального - возрастает сопротивление расширения [1, 19].

Функция  $\xi_{\text{диф}} = f(\alpha)$  имеет минимум при оптимальном значении угла  $\alpha$ , которое определяется следующим выражением:

$$\alpha_{\text{опт}} = \arcsin \sqrt{\left( \frac{n_{\text{диф}} + 1}{n_{\text{диф}} - 1} \right) \cdot \frac{\lambda}{4}}$$

При  $\lambda = 0,015 \dots 0,025$  и  $n_{\text{диф}} = 2 \dots 4$  оптимальный угол диффузора  $\alpha_{\text{опт}} = 6^\circ$ , что соответствует исследованиям [1, 19, 29].

Длина диффузора будет равна:

$$l_{\text{диф}} = \frac{d_2 - d_1}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{\text{опт}}}{2}\right)},$$

На практике не всегда можно применять длинные диффузоры с малыми углами расширения из-за ограниченности габаритов и для упрощения конструкции. С целью снижения газодинамического сопротивления диффузора его выполняют с оптимальным углом расширения в несколько ступеней [1, 19, 29].

#### 2.4.2 Обоснование геометрических параметров выходной части КУСТ

Переход от большого сечения к меньшему через плавно сужающуюся трубу - конфузор - сопровождается потерями давления газов. При течении газа в конфузоре происходит увеличение скорости и снижение давления [1].

Потери давления в конфузоре равны:

$$\Delta p_k = \Delta p_{тр} = \xi_k \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (2.6)$$

Формула 2.6 учитывает только силу трения по длине, так как отсутствует отрыв потока. Но в конфузоре частицы газа ударяются о его стенки, изменяя направление движения, в результате чего происходит вихреобразование, поэтому автором данной работы предлагается для расчёта потерь давления в конфузоре учесть коэффициент сопротивления вихреобразования, тогда:

$$\Delta p_k = \Delta p_{тр} + \Delta p_{вих} = (\xi_{тр} + \xi_{вих}) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

Коэффициент газодинамического сопротивления конфузора (рисунок 2.5) зависит от угла сужения  $\alpha_k$  и коэффициента сопротивления трения  $\lambda$ .

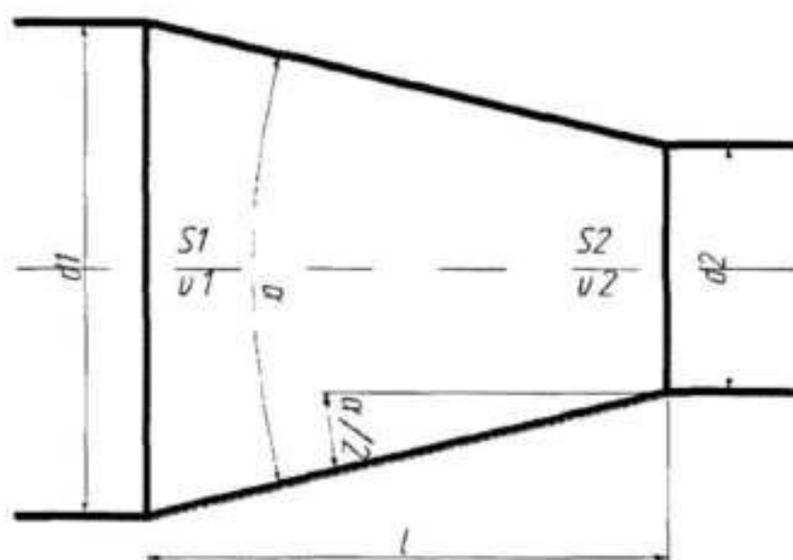


Рисунок 2.5 - Геометрические параметры конфузора

Газодинамическое сопротивление трению определяется по формуле:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_k}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_k^2}\right)$$

где  $n_k$  - степень сужения конфузора;

$\alpha_k$  - угол сужения конфузора, град.

$$n_k = \frac{S_1}{S_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2},$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - площадь поперечного сечения конфузора на входе и выходе соответственно.

$d_1$  и  $d_2$  - диаметр конфузора на входе и выходе соответственно.

Газодинамическое сопротивление вихреобразования будет определяться по формуле [1, 52]:

$$\xi_{\text{вих}} = \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)^2 \cdot k = \left(1 - \frac{1}{n_k}\right)^2 \cdot k,$$

где  $k = \sin \alpha_k$  - коэффициент смягчения.

Таким образом, общий газодинамический коэффициент сопротивления конфузора будет равен:

$$\xi_k = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_k}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_k^2}\right) + \sin \alpha_k \cdot \left(1 - \frac{1}{n_k}\right)^2.$$

Длина конфузора определяется по формуле:

$$l_k = \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_k}{2}\right)}.$$

В пределах  $10^\circ < \alpha/2 < 40^\circ$  коэффициент газодинамического сопротивления конфузора с прямолинейными образующими имеет минимум при  $Re \geq 10^5$  и остаётся постоянным и равным  $\xi_k = 0,05$  [1, 52].

### 2.4.3 Разработка и обоснование зоны засыпки катализатора

В настоящее время усилиями многих научных коллективов в направлении совершенствования систем очистки ОГ, достигнуты важные научные и практические результаты. Вместе с тем недостаточно

исследованными являются вопросы протекания газодинамических процессов в реакторах каталитических систем очистки ОГ, которые существенно влияют на эффективность процесса нейтрализации токсичных компонентов, значение газодинамического сопротивления в выпускной системе, снижение мощности двигателя и другие показатели [1, 41].

Падение давления в зоне засыпки катализатора (в реакторе) определяется по формуле [1, 41]:

$$\Delta p_3 = \xi_3 \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \frac{a \cdot l}{\varepsilon^3},$$

где  $a$  - удельная поверхность слоя засыпки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$  [88];

$\xi_3$  - коэффициент газодинамического сопротивления зоны засыпки катализатора;

$\varepsilon$  - порозность слоя засыпки,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Порозность слоя вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_r}{V_c},$$

где  $V_r$  - объём, занимаемый гранулами катализатора,  $\text{м}^3$ ;

$V_c = V_p$  - объём слоя засыпки, равный объёму реактора,  $\text{м}^3$ ;

Объём гранул катализатора равен:

$$V_r = V_1 \cdot n,$$

где  $V_1$  - объём, занимаемый одной гранулой,  $\text{м}^3$ ;

$n$  - количество гранул в слое.

Удельная поверхность слоя из шаров определяется по формуле:

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_m},$$

где  $d_m$  - диаметр отдельного шара, м.

Авторы работ [1, 19] рассматривают отдельно потери давления на трение по длине реактора и потери трения в зоне засыпки катализатора, поэтому удельная поверхность слоя катализатора определяется без учёта коэффициента трения стенок.

Нами предлагается рассчитать удельную поверхность слоя катализатора с учётом поверхности стенок реактора. Внутреннюю поверхность реактора на единицу объёма можно определить по формуле:

$$a_p = \frac{S_{\text{вн}}}{V_p}, \text{ м}^2/\text{м}^3$$

где  $S_{\text{вн}}$  - внутренняя поверхность реактора,  $\text{м}^2$ ;

$V_p$  - объём реактора,  $\text{м}^3$ .

Внутренняя поверхность реактора определяется по формуле:

$$S_{\text{вн}} = \pi \cdot D_p \cdot H_p,$$

где  $D_p$  - внутренний диаметр реактора, м,

$l_p$  - высота реактора (высота слоя засыпки), м.

Объём реактора равен:

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4} \cdot H_p,$$

Значит, удельная поверхность реактора составит:

$$a_p = \pi \cdot D_p \cdot H_p \cdot \frac{4}{\pi \cdot D_p^2 \cdot H_p} = \frac{4}{D_p}, \text{ м}^2/\text{м}^3$$

Тогда, с учётом коэффициента, учитывающего ориентацию тел слоя засыпки от направления движения газа в вязкостном режиме, получим удельную поверхность зернистого слоя:

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_m} + 0,75 \cdot \frac{4}{D_p} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_m} + \frac{3}{D_p},$$

Коэффициент газодинамического сопротивления слоя составляет [41]:

$$\xi_z = \frac{8 \cdot K}{Re},$$

где  $K$  - постоянная Козени-Кармана.  $K = 4,5$ ;

$Re$  - число Рейнольдса.

В устройстве слой катализатора ограничивается подвижной и неподвижной сетками, поэтому в расчёт коэффициента газодинамического сопротивления должны входить сопротивления сеток [24]:

$$\xi_{\text{тр}}^c = k_{\text{сз}} \cdot \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right) + \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2,$$

где  $k_{\text{сз}}$  - коэффициент степени загрязнения сетки;

$S_1$  - площадь живого сечения сетки (суммарная площадь всех отверстий), м<sup>2</sup>;

$S_2$  - площадь канала за сеткой (сечение трубы), м<sup>2</sup>.

Площадь живого сечения сетки с квадратными ячейками определяется по формуле [81]:

$$S_1 = n \cdot S_{\text{отв}} = n \cdot a^2$$

где  $n$  - количество отверстий в сетке;

$a$  - сторона одного отверстия, м.

Площадь канала за сеткой равна площади реактора:

$$S_2 = S_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4}$$

Коэффициент загрязнения сетки определяется опытным путём по изменению потерь давления в сравнении с новой сеткой. Установлено, что коэффициент загрязнения сетки для новой сетки равен:  $k_{\text{сз}} = 1$ , для не окисленных и не запылённых сеток  $k_{\text{сз}} = 1,3$ , а для сеток из шёлка  $k_{\text{сз}} = 2,1$  [39].

В диссертационной работе предлагается теоретическая формула для определения коэффициента степени загрязнения сетки, которая показывает во сколько раз площадь живого сечения новой сетки больше площади живого сечения загрязнённой сетки [35]:

$$k_{\text{сз}} = \frac{S_1^{\text{н}}}{S_1^{\text{з}}}$$

где  $S_1^{\text{н}}$  - площадь живого сечения новой сетки, м<sup>2</sup>;

$S_1^{\text{з}}$  - площадь живого сечения загрязнённой сетки, м.

По данной формуле сложно определить живое сечения загрязнённой сетки, поэтому автором предлагается аналитически определять степень загрязнения сетки, выполняющей функцию ограничения слоя катализатора в

устройстве нейтрализации ОГ и работающей в зоне диапазона температур 0-700°C, по сравнению масс новой и загрязнённой сеток. Необходимо учесть, что при загрязнении сетки её масса может увеличиваться, но площадь живого сечения остаться неизменной, поэтому в формулу коэффициента загрязнения сетки необходимо ввести поправочный коэффициент [35].

$$k_{сз} = k \cdot \frac{m_c^H}{m_c^3}$$

где  $k$  - поправочный коэффициент, учитывающий изменение площади живого сечения сетки в зависимости от условий эксплуатации;

$m_c^H$  - масса новой сетки, кг;

$m_c^3$  - масса загрязнённой сетки, кг.

Коэффициент  $k$  для конкретных условий работы можно определить косвенными измерениями [45]:

$$k = \frac{m_c^3 \cdot \Delta p_c^H}{m_c^H \Delta p_c^3}$$

где  $\Delta p_c^H$  - потери давления новой сетки, Па;

$\Delta p_c^3$  - потери давления загрязнённой сетки, Па.

В результате проведённых опытов коэффициент, учитывающий изменение площади живого сечения сетки составил:  $k = 0,868$ .

#### 2.4.4 Обоснование геометрических параметров Г-образного патрубка

Газодинамический коэффициент сопротивления в Г-образном патрубке складывается из сопротивления отвода и коэффициента трения по длине трубы [69]:

$$\xi_n = \xi_{отв} + \xi_l,$$

где  $\xi_{отв}$  - коэффициент газодинамического сопротивления отвода круглого сечения;

$\xi_l$  - коэффициент газодинамического сопротивления по длине трубы.

Сопротивление отвода складывается из местных сопротивлений (поворот на 180°) и сопротивлений трения [69]:

$$\xi_m = \xi_m + \xi_{тр}$$

где  $\xi_m$  - коэффициент местного сопротивления,

$\xi_{тр}$  - коэффициент сопротивления трения.

Коэффициент местного сопротивления отвода определяется по формуле [39]:

$$\xi_m = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1,$$

где  $A_1$  - коэффициент, учитывающий влияние угла  $\delta$  изогнутости отвода (таблица 2.3);

$B_1$  - коэффициент, учитывающий влияние относительного радиуса  $R_0/D_0$  ( $R_0/b_0$ ) закругления отвода (таблица 2.4);

$C_1$  - коэффициент, учитывающий влияние относительной вытянутости поперечного сечения отвода  $a_0/b_0$  (таблица 2.5);

$R_0$  - радиус поворота отвода, м,

$D_0$  - внутренний диаметр отвода, равный гидравлическому диаметру, м,

$a_0$  - ширина профиля отвода, м,

$b_0$  - высота профиля отвода, м.

Таблица 2.3 - Формулы расчёта коэффициента  $A_1$

$\delta$	До $70^\circ$	$90^\circ$	Свыше $100^\circ$
$A_1$	$0,9 \cdot \sin \delta$	1,0	$0,7 + 0,35 \cdot \delta / 90^\circ$

Таблица 2.4 - Формулы расчёта коэффициента  $B_1$

$R_0/D_0$ ( $R_0/b_0$ )	0,5-1,0	Свыше 10
$B_1$	$0,21 \cdot (R_0/D_0)^{-2,5}$	$0,21 \cdot (R_0/D_0)^{-0,5}$

Таблица 2.5 - Формулы расчёта коэффициента  $C_1$

$a_0/B_0$	До 4	Свыше 4
$C_1$	$0,85 + \frac{0,125}{a_0/b_0}$	$1,115 - \frac{0,84}{a_0/b_0}$

Для отводов круглого и квадратного сечений  $C_1 = 1$ .

Коэффициент сопротивления трения определяется по формуле:

$$\xi_{\text{тр}} = 0,0175 \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \frac{R_0}{D_{\Gamma}},$$

где  $\lambda$  - коэффициент трения,

$D_{\Gamma} = D_0$  - гидравлический диаметр отвода, м.

Коэффициент газодинамического сопротивления по длине трубы определяется по формуле Дарси-Вейсбаха [72]:

$$\xi_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{D_0},$$

где  $l$  - длина трубы, м,

$D_0$  - внутренний диаметр трубы, м.

Таким образом, общее газодинамическое сопротивление патрубка составит:

$$\xi_n = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 + 0,0175 \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \frac{R_0}{D_{\Gamma}} + \lambda \cdot \frac{l}{D_0},$$

2.4.5 Расчёт газодинамического сопротивления эжекторного сопла  
 Эжектор представляет собой плавно сужающееся сопло с прямолинейными образующими, поэтому, как и в конфузоре (рисунок 2.5) учитываются потери на трение и вихреобразование [39]:

$$\xi_{\text{э}} = \xi_{\text{тр}} + \xi_{\text{вих}}$$

Коэффициент сопротивления трения эжектора определяется по формуле [56]:

$$\xi_3 = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_3^2}\right),$$

где  $n_3$  - степень сужения эжектора;

$\alpha_3$  - угол сужения эжектора, град.

$$n_3 = \frac{S_1}{S_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2},$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - площадь поперечного сечения эжектора на входе и выходе соответственно.

Газодинамическое сопротивление вихреобразования определяется по формуле:

$$\xi_3 = \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)^2 \cdot k = \left(1 - \frac{1}{n_3}\right)^2 \cdot k,$$

где  $k = \sin \alpha_3$  - коэффициент смягчения.

Таким образом, общий коэффициент сопротивления эжектора составит:

$$\xi_3 = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_3}\right) + \sin \alpha_3 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_3}\right)^2.$$

Опытами установлено, что при оптимальной горловине диффузора  $l=4d$ , оптимальный угол эжекторного сопла составляет  $\alpha_3 = 19^\circ$ . Длина эжектора определяется по формуле:

$$l_3 = \frac{d_1 - d_2}{2 \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)}.$$

#### 2.4.6 Общее газодинамическое сопротивление КУСТ

Общий газодинамический коэффициент сопротивления КУСТ складывается из коэффициентов сопротивления его частей и элементов: эжектора, диффузора, зоны засыпки катализатора, двух сеток, ограничивающих слой катализатора, конфузора и Г-образного патрубка [1, 19, 44].

$$\xi_{\text{КУСТ}} = \xi_3 + \xi_d + \xi_{\text{тр}}^c + \xi_3 + \xi_{\text{тр}}^c + \xi_k + \xi_n, \quad (2.7)$$

После подстановки формул соответствующих составляющих, формула 2.7 запишется в виде:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{ОБЩ}} = & \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_3^2}\right) + \sin\alpha_3 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_3}\right)^2 + \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_d}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_d^2}\right) \\ & + \sin\alpha_d \cdot \left(1 - \frac{1}{n_d}\right)^2 + 2 \cdot \left[ k_{\text{сз}} \cdot \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right) + \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 \right] + \frac{8 \cdot K}{Re} \\ & + \left[ \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha_k}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_k^2}\right) + \sin\alpha_k \cdot \left(1 - \frac{1}{n_k}\right)^2 \right] \\ & + \left[ A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 + 0,0175 \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \frac{R_0}{D_\Gamma} + \lambda \cdot \frac{1}{D_0} \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Для предлагаемого устройства очистки ОГ общий газодинамический коэффициент сопротивления составил:  $\xi_{\text{ОБЩ}} = 0,386$ , для его прототипа  $\xi_{\text{ОБЩ}} = 0,523$ .

## 2.5 Математическая модель описания процессов, протекающих в устройстве снижения токсичности

Исследование устройств снижения токсичности ОГ дизельных двигателей заключается не только в анализе каталитических процессов, протекающих в реакторе, газодинамики конструкции, процессов дожигания, тепло- и массопереноса, но и в комплексном согласовании параметров различных процессов для построения математических моделей [1, 19, 20].

Эффективность работы устройства очистки ОГ связана с изменением топливно-экономических показателей двигателя и зависит в основном от протекания газодинамических процессов и процессов массообмена.

Процессы очистки отработавших газов в КУСТ представлены на рисунке 2.6 в виде блок-схемы. По рисунку видно, что поток отработавших газов, проходя через эжектор, смешивается с газами, которые прошли очистку, и поступают в фильтр-отстойник, где конденсируются компоненты ОГ.



Рисунок 2.6 - Блок-схема процесса очистки отработавших газов в КУСТ

Несконденсированные газы дожигаются электрическим нагревателем. Затем поток газов поступает в реактор где, в результате химических реакций, вещества токсичных компонентов оседают на поверхности катализатора. Часть потока, прошедшего очистку, поступает на повторную через эжектор, остальная поступает в атмосферу.

Согласно закону сохранения энергии [27]:

$$m_{\text{ОГ}}^{\text{вход}} + m_{\text{Э}} - m_{\text{конд}} - m_{\text{К}} - m_{\text{Э}} - m_{\text{ОГ}}^{\text{вых}} = 0, \quad (2.9)$$

где  $m_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}$  - масса загрязняющих веществ на входе в КУСТ, кг;

$m_{\text{Э}}$  - масса эжектируемого газа, кг;

$m_{\text{конд}}$  - конденсата, кг;

$m_{\text{К}}$  - масса частиц осевших на поверхности катализатора, кг;

$m_{\text{ОГ}}^{\text{вых}}$  - масса загрязняющих веществ на выходе КУСТ, кг.

Если поделить выражение 2.9 на единицу времени и преобразовать, получим уравнение изменения количества загрязняющих веществ ОГ в КУСТ:

$$G_{\text{ОГ}}^{\text{вход}} - G_{\text{ОГ}}^{\text{вых}} = G_{\text{К}} + G_{\text{конд}},$$

где  $G_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}$  - количество загрязняющих веществ ОГ на входе в КУСТ, кг/ч;

$G_{\text{ОГ}}^{\text{вых}}$  - количество загрязняющих веществ ОГ на выходе КУСТ, кг/ч;

$G_{\text{К}}$  - количество частиц осевших на поверхности катализатора, кг/ч;

$G_{\text{конд}}$  - количество образовавшегося конденсата, кг/ч.

Количество частиц осевших на поверхности катализатора за 1 ч определяется по формуле [18]:

$$\Delta G = G_{\text{К}} = u \cdot \rho \cdot V_{\text{К}},$$

где  $u$  - скорость химико-технологического процесса превращения, ч<sup>-1</sup>;

$V_{\text{К}}$  - объём реактора, м<sup>3</sup>;

$\rho$  - плотность ОГ, кг/м<sup>3</sup>.

Объём реактора можно определить по формуле:

$$V_{\text{р}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{р}}^2 \cdot H_{\text{р}}}{4},$$

где  $D_{\text{р}}$  - диаметр реактора, м;

$H_{\text{р}}$  - высота слоя засыпки катализатора (высота реактора).

Скорость химической реакции определяется по формуле [19]:

$$u = k(T) \cdot \frac{\Delta C}{t},$$

где  $k(T)$  - константа химической реакции (формула 2.1);

$\Delta C$  - изменение концентрации ОГ, в долях;

$t$  - время протекания химико-технологического процесса, ч.

Преобразовав уравнение Максвелла для скорости конденсации [18] через изменение массы капли получим:

$$G_{\text{конд}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot (r^3 - r_0^3)}{t},$$

где  $r$  - максимальный радиус капли, м. Для отработавших газов дизельных ДВС  $r = 50 \cdot 10^{-6}$  м [24];

$r_0$  - минимальный радиус капли, м. Для отработавших газов дизельных ДВС  $r_0 = 50 \cdot 10^{-6}$  м;

Изменение количества загрязняющих веществ ОГ в КУСТ определяется суммой скорости конденсации газов и скорости расходования исходной смеси газов в результате химической реакции, протекающей в элементарном объёме катализатора.

$$\Delta G = \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot (r^3 - r_0^3)}{t} + k(T) \cdot \frac{\Delta C}{t} + \frac{\pi \cdot D_p^2 \cdot H_p}{4},$$

После преобразования получим

$$\Delta G = \frac{\pi \cdot \rho}{4 \cdot t} \cdot (16 \cdot (r^3 - r_0^3) + k(T) \cdot \Delta C \cdot D_p^2 \cdot H_p), \quad (2.10)$$

Уравнение падения давления в комбинированном устройстве очистки ОГ имеет вид:

$$\Delta p = \Delta p_э + \Delta p_д + \Delta p_с + \Delta p_р + \Delta p_к + \Delta p_п, \quad (2.11)$$

где  $\Delta p_э$  - падение давления в эжекторе, Па;

$\Delta p_д$  - падение давления в диффузоре, Па;

$\Delta p_с$  - падение давления в сетке, Па;

$\Delta p_р$  - падение давления в реакторе, Па;

$\Delta p_к$  - падение давления в конфузоре, Па;

$\Delta p_п$  - падение давления в Г-образном патрубке, Па.

Подставив составляющие в формулу 2.11 с учётом 2.8, получим:

$$\Delta p = \xi_{\text{общ}} \cdot \frac{\rho \cdot v}{2}, \quad (2.12)$$

Таким образом, разработана математическая модель (2.10) и (2.12) описания процессов, протекающих в КУСТ.

Для оценки эффективности процесса очистки ОГ разработанным устройством были введены два удельных показателя: качества очистки ОГ и энергоёмкости устройства [19].

Удельный показатель качества очистки ОГ характеризует долю очищенных токсичных компонентов, приходящуюся на килограмм топлива в единицу времени, и определяется как отношение степени очистки ОГ к массовому расходу топлива [19]:

$$q_{\Delta G} = \frac{\left( \frac{G_{\text{ОГ}}^{\text{вход}} - G_{\text{ОГ}}^{\text{вых}}}{G_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}} \right) \cdot 100\%}{G_T}, \text{ \%}/(\text{кг/ч}) \quad (2.13)$$

где  $G_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}$  - количество загрязняющих веществ ОГ на входе в КУСТ, кг/ч;

$G_{\text{ОГ}}^{\text{вых}}$  - количество загрязняющих веществ ОГ на выходе из КУСТ, кг/ч;

$G_T$  - массовый расход топлива, кг/ч.

Удельный показатель качества очистки ОГ по теоретической модели для КУСТ составил:  $q_{\Delta G} = 1,52 \text{ \%}/(\text{кг/ч})$ .

Удельный показатель энергоёмкости устройства характеризует потери энергии в нём, приходящиеся на килограмм топлива в единицу времени, и определяется как отношение степени изменения давления ОГ в КУСТ к массовому расходу топлива [19]:

$$q_{\Delta G} = \frac{\left( \frac{P_{\text{ОГ}}^{\text{вход}} - P_{\text{ОГ}}^{\text{вых}}}{P_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}} \right) \cdot 100\%}{G_T}, \text{ \%}/(\text{кг/ч}) \quad (2.14)$$

где  $P_{\text{ОГ}}^{\text{вход}}$  - давление ОГ на входе в КУСТ, Па;

$P_{\text{ОГ}}^{\text{вых}}$  - давление ОГ на выходе из КУСТ, Па.

Удельный показатель энергоёмкости КУСТ по теоретической модели составил:  $q_{\Delta G} = 0,0221 \text{ \%}/(\text{кг/ч})$ .

Таким образом, получив значения удельных показателей, можно говорить об оценке эффективности КУСТ.

Эффективность КУСТ характеризует работу устройства и показывает, во сколько раз удельная степень очистки ОГ от токсичных компонентов превышает удельную степень повышения противодавления в устройстве и

определяется отношением показателя качества очистки (2.13) к показателю энергоёмкости (2.14) [19]:

$$\mathcal{E}_{\text{КУСТ}} = \frac{q_{\Delta G}}{q_{\Delta p}}, \frac{\% / (\text{кг/ч})}{\% / (\text{кг/ч})} \quad (2.15)$$

Возможны два варианта показателя эффективности КУСТ ОГ, по которым проводится оценка работы устройства:

1.  $\mathcal{E}_{\text{КУСТ}} > 1$  - значит, удельный показатель качества очистки ОГ от токсичных компонентов превышает удельный показатель энергоёмкости КУСТ, то есть устройство эффективно работает.
2.  $\mathcal{E}_{\text{КУСТ}} \leq 1$  - в этом случае показатель энергоёмкости КУСТ равен или выше удельного показателя качества очистки ОГ, то есть устройство не эффективно.

По теоретическому показателю эффективности работы КУСТ, который составил  $\mathcal{E}_{\text{КУСТ}} = 68,8$ , можно сделать вывод, что предлагаемое устройство работает эффективно.

## 2.6 Выводы

1. Получена теоретическая формула для расчёта общего коэффициента газодинамического сопротивления КУСТ ОГ, значение которого составило  $\xi_{\text{ОВЦ}} = 0,386$ .

2. Разработана математическая модель описания процессов, протекающих в КУСТ, составляющие которой являются: зависимости изменения количества ОГ и потерь давления в КУСТ от его геометрических параметров.

3. Рассчитан удельный показатель качества очистки ОГ устройством, который составил  $q_{\Delta G} = 1,52 \% / (\text{кг/ч})$ .

4. Рассчитан удельный показатель энергоёмкости КУСТ, который составил  $q_{\Delta p} = 0,0221 \% / (\text{кг/ч})$ .

5. Обоснована техническая эффективность устройства  $\mathcal{E}_{\text{КУСТ}} = 68,8$ , которая показала, что КУСТ использовать эффективно.

### 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1 Программа экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований является подтверждение результатов теоретических исследований, обоснование параметров КУСТ и определение зависимостей эффективности очистки ОГ.

Для выполнения поставленной цели необходимо:

1. Подготовить оборудование для проведения исследований.
2. Определить зависимости  $\Delta p$ ,  $G_T$ ,  $T_{OГ} = f(N)$
3. Определить изменение токсичности ОГ.
4. Установить зависимость коэффициента газодинамического сопротивления устройства и коэффициента загрязнения сетки.
5. Обосновать оптимальные параметры КУСТ.
6. Провести обработку опытных данных.

Использование ГОСТов, ОСТов на испытание ДВС и типовых, апробированных методик обеспечивает качественное сравнение результатов, высокую точность оценки закономерностей, исключения в анализе неучтённых факторов.

#### 3.2 Методика проведения стендовых исследований

Исследования проводились в соответствии с государственными и отраслевыми стандартами в ООО «МТК Ак Барс» (рисунок 3.1) Исследовался двигатель КАМАЗ-740 (техническая характеристика в приложении Б) установленный на автомобиле КАМАЗ-53212.

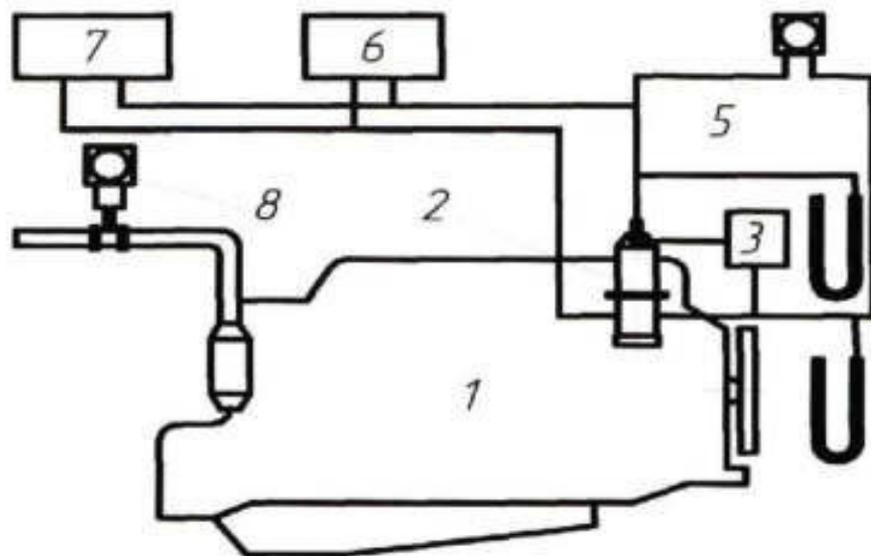
При проведении исследований на стенде определялись параметры работы двигателя под нагрузкой, определяемой скоростью автомобиля на первой передаче.



Рисунок 3.1 – Стенд СТС-13У-СП-11

Схема подключения приборов к двигателю представлена на рисунке

3.3.



1 - двигатель КАМАЗ-740; 2 - экспериментальный КУСТ; 3 - измеритель температуры; 4 - пьезометры; 5 - расходомер ОГ; 6 - газоанализатор; 7 - дымомер; 8 - расходомер топлива

Рисунок 3.3 - Схема подсоединения приборов к ДВС

Общий вид исследуемого КУСТ представлен на рисунке 3.4 [83].



Рисунок 3.4 - Общий вид КУСТ

В данном устройстве установлен никельсодержащий катализатор тройного действия, не содержащий драгоценных металлов, разработанный НИИ химии Саратовского государственного университета, представляющий собой гранулы с нанесённым катализатором [108].

Электропитание электрической спирали для дожига ОГ в устройстве очистки осуществляется от аккумуляторной батареи 12В емкостью 60 А·ч. Рабочее напряжение электрической нихромовой спирали составляет 11,8 В, электрическое сопротивление 3 Ом. Тепловая энергия подводится к потоку ОГ от электрического нагревателя мощностью 46 Вт.

Испытания проводились при температуре окружающего воздуха 25°C, давлении 740 мм.рт.ст.

Экспериментальное КУСТ, установленное на выпускном коллекторе двигателя автомобиля КАМАЗ-53212, представлено на рисунке 3.5.

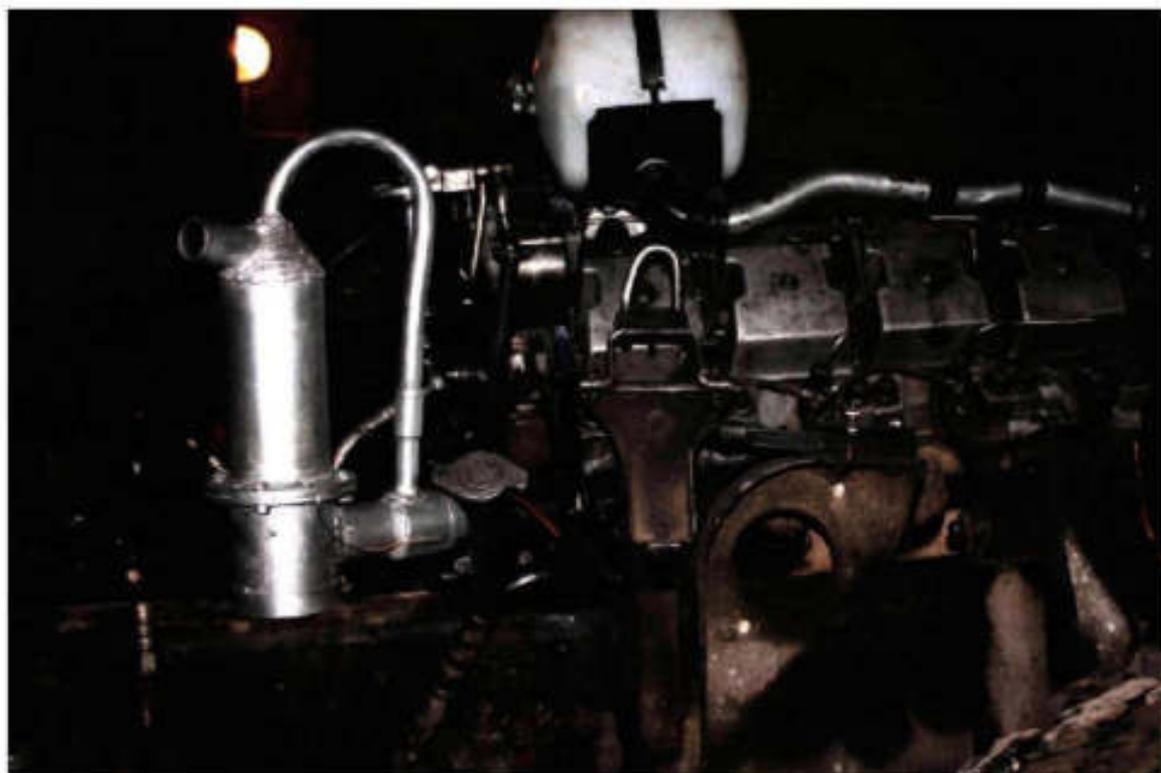


Рисунок 3.5 - КУСТ, установленное на автомобиле КАМАЗ-53212

3.2.1 Подготовка оборудования для проведения экспериментальных исследований

Перед проведением исследований проверялось состояние ДВС, которое должно отвечать следующим требованиям [6]:

- утечки топлива в магистралях и элементах топливной системы отсутствуют;
- утечки охлаждающей жидкости отсутствуют;
- регулировки ТНВД выполнены согласно паспортным данным (приложение В);
- давление впрыска топлива согласно паспортным данным на двигатель (таблица Б2).

Испытательный стенд проходил метрологическую аттестацию.

Все измерительные приборы, используемые в исследованиях, были отгарированы и подвергались поверке.

Экспериментальное КУСТ ОГ проверялось на герметичность и надёжность подвода электроэнергии к электрической спирали.

### 3.2.2 Определение мощности ДВС

Замер мощности ДВС при испытании производится косвенным измерением на установившемся режиме и осуществляется в следующей последовательности:

1. Автомобиль с грузом задним мостом заезжает на катки стенда своим ходом.
2. В режиме холостого хода ДВС прогревается до температуры  $82^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ;
3. Водителем автомобиля включается первая передача и нажимается педаль акселератора до тех пор, пока автомобиль достигнет максимальной (или требуемой нагрузочным режимом) скорости. Скорость автомобиля определяется в зависимости от частоты вращения катков стенда и выводится на экране стойки управления, за которым следит испытатель.
4. После достижения требуемой скорости водитель автомобиля фиксирует положение педали акселератора.

5. Автомобиль работает в данном режиме в течение 5 мин., для получения установившегося режима.

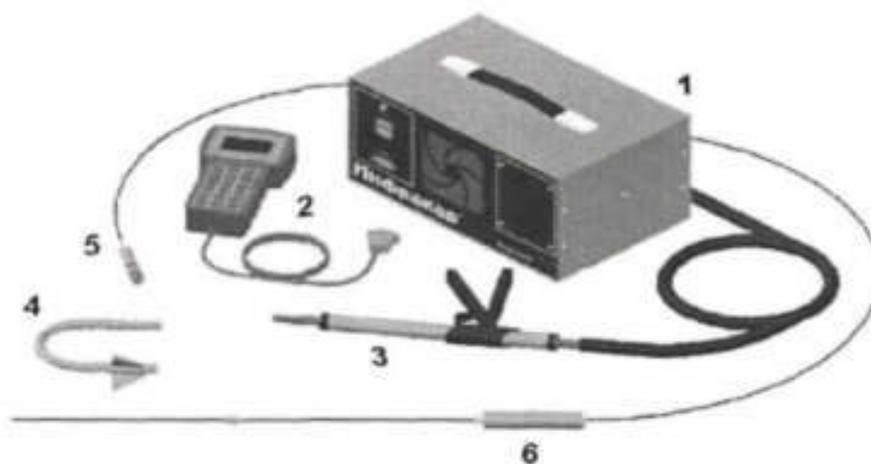
Исходя из показаний скорости, определяется мощность ДВС по формуле, представленной в п.3.4.

Операции 3-5 повторяются для каждого нагрузочного режима.

Для более быстрого получения установившегося режима рекомендуется задавать нагрузку на ДВС, начиная с максимальной мощности (150 кВт) через 15 кВт.

### 3.2.3 Замер дымности отработавших газов

Для измерения дымности ОГ дизеля применяется дымомер Инфракар 1 (рисунок 3.6), соответствующий ГОСТ Р 41.24-2003 и ГОСТ Р 52160-2003, работающий по принципу измерения оптической плотности ОГ при просвечивании, зависящей от концентрации сажевых частиц.



1- оптический блок; 2- пульт управления; 3- газоотборный зонд с пробоотборным шлангом; 4- зонд для вертикального расположения выпускной системы; 5 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 6 – датчик температуры масла

Рисунок 3.6 – Общий вид дымомера

Прибор имеет оптический блок 1, пульт управления 2 и проотборное устройство 3. При работе дизеля измерительный блок присоединяется к выхлопной трубе при помощи пробозаборника.

При проведении замеров устанавливали дымомер так, чтобы прямые солнечные лучи не падали на его заднюю поверхность.

Процесс замера дымности осуществляется в следующей последовательности:

1. Подключается сетевой кабель к разъему оптического блока. Соединяется кабель связи к разъему оптического блока и к разъему пульта управления. Элементы газоотборной системы соединяются со штуцером оптического блока. Разъем датчика температуры подключается к разъему оптического блока. Сетевой выключатель переводится в положение «I».

2. Прогревается рабочая камера оптического блока до температуры не ниже  $65^{\circ}\text{C}$ . Прибор готов к проведению измерений.

3. На дисплее прибора выбирается режим измерения температуры двигателя. Датчик температуры устанавливается на место масляного щупа ДВС.

4. Запускается и прогревается ДВС до температуры  $82^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  в режиме холостого хода.

5. Выключается двигатель и устанавливается зонд для отбора ОГ из выпускной трубы в дымомер.

6. Дымомер выставляется на ноль.

7. Запускается двигатель и водителем устанавливается соответствующий нагрузочный установившийся режим.

8. Производится замер дымности. На дисплее дымомера появляется значение дымности. Если результат измерения недействительный, то измерение повторяется до получения действительного результата;

9. Результат измерения заносится в таблицу 3.1.

10. Повторяются операции 6-9 для остальных нагрузочных режимов;

11. Сетевой выключатель переводится в положение «0».

12. Двигатель останавливается.

13. На выпускной коллектор ДВС устанавливается и герметично закрепляется экспериментальное КУСТ ОГ.

14. Сетевой выключатель дымомера переводится в положение «I».

15. Повторяются операции 2-10 с установленным КУСТ.

16. Сетевой выключатель переводится в положение «0».

Отсоединяются: датчик температуры, элементы газоотборной системы и сетевой кабель.

17. Двигатель останавливается.

При замерах нагрузочный режим задаётся, начиная со 150 кВт с интервалом 15 кВт.

Таблица 3.1- Результаты замера дымности

Мощность N, кВт	Температура воздуха, T, К	Атмосферное давление, P, Па	Коэффициент ослабления света, N%	Эффективная база дымомера, L, м
150				
135				
...				
30				
15				

#### 3.2.4 Определение концентраций токсичных компонентов

Для измерения концентраций основных токсичных компонентов ОГ дизельного ДВС применялась измерительная аппаратура, соответствующая ГОСТ 13320-81/

Измерение значений концентраций CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и O<sub>2</sub> осуществлялось высокоточным газоанализатором TESTO-350 (рисунок 3.7) [51].

Измерительный прибор газоанализатора состоит из датчика и преобразователя-анализатора. Датчик осуществляет преобразование и перерасчёт концентраций токсичных компонентов в электрический аналоговый и цифровой сигнал. Прибор имеет стандартный интерфейс RS232 для вывода на печатающее устройство или на порт внешнего ПК. Прибор

позволяет проводить количественный анализ состава ОГ и включает электрохимические датчики концентрации газов, датчик давления, всасывающий насос и фильтр конденсата. Встроенный насос забирает порцию исследуемого газа из выпускной трубы дизеля через зонд.



Рисунок 3.7 – Общий вид газоанализатора TESTO-350

Замеры концентрации токсичных компонентов проводятся в следующей последовательности.

1. Запускается и прогревается двигатель до рабочей температуры  $82^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  в режиме холостого хода.
2. В место замера токсичности устанавливается измерительный зонд.
3. Водитель автомобиля устанавливается соответствующий нагрузочный режим.
4. Подключается питание прибора и сетевой переключатель переводится в положение «I». На дисплее прибора выбирается тип двигателя, вид топлива и тип измерения.
5. Проводится замер концентрации компонентов  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{O}_2$ .
6. Результаты измерений заносятся в таблицу 3.2.
7. Кнопкой на дисплее прибора проводится сброс результатов.
8. Повторяются операции 3-7 для других нагрузочных режимов.
9. Сетевой переключатель переводится в положение «O».

10. Снимается измерительный зонд.
11. ДВС останавливается.
12. На выпускной коллектор ДВС устанавливается и герметично закрепляется экспериментальное КУСТ.
13. Операции 1-8 повторяются с установленным КУСТ ОГ.
14. Сетевой переключатель прибора переводится в положение «О».
15. Снимается измерительный зонд и отключается питание прибора.
16. ДВС останавливается.

При замерах нагрузочный режим задаётся, начиная со 150 кВт с интервалом 15 кВт.

Таблица 3.2 - Результаты замера концентрации токсичных компонентов

Мощность N, кВт	Концентрация компонентов ОГ, %				Температура воздуха, Т,К	Атмосферное давление, Р, Па
	СН	СО <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>2</sub>		
150						
135						
...						
30						
15						

### 3.2.5 Измерение часового расхода топлива

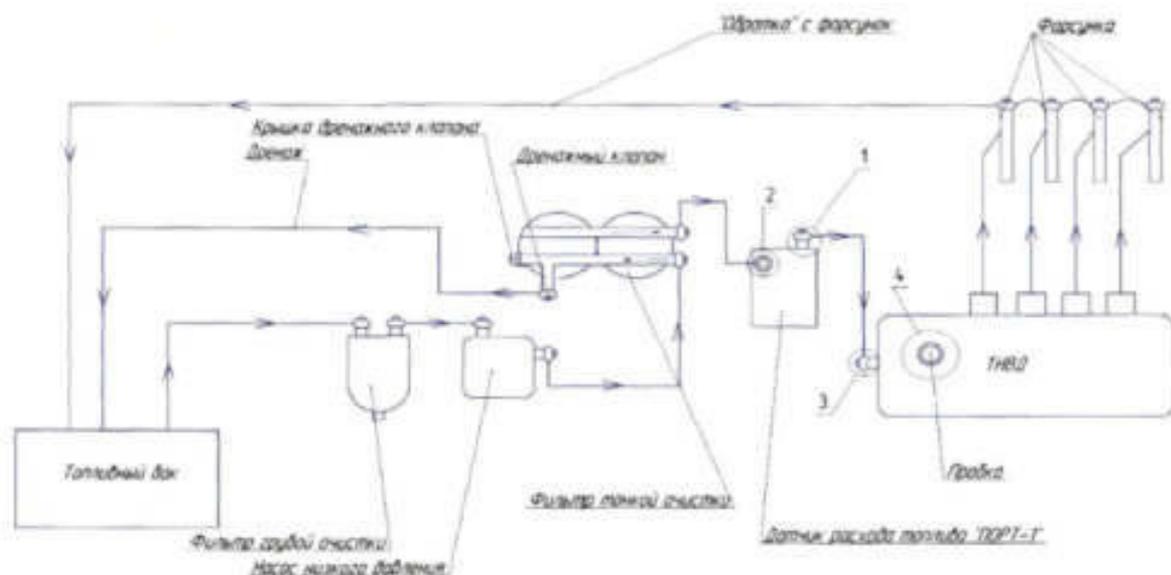
Для замера часового расхода топлива использовался расходомер серии «Порт-1» (рисунок 3.8).

Расходомер состоит из датчика расхода топлива (ДРТ), контроллера и монитора.



Рисунок 3.8 –Расходомер «Порт-1»

ДРТ формирует электрические импульсы, частота которых определяется расходом проходящего через датчик топлива. Импульсы поступают в контроллер, где происходит расчёт расхода топлива за 1 час, суммарного расхода топлива и отсчёт времени работы двигателя. В расчётах учитывается температура топлива с помощью датчика температуры, размещённого в ДРТ. Монитор используется для вывода параметров. На рисунке 3.9 представлена схема монтажа ДРТ на двигателе.



1 – выходной канал ДРТ; 2 - входной канал ДРТ; 3 - топливная магистраль ТНВД; 4 - дренажный клапан

Рисунок 3.9 - Схема установки ДРТ на двигателе

Отверстие дренажного клапана ТНВД 4 (см. рисунок 3.9) закрывается пробкой. Дополнительный клапан в фильтре тонкой очистки удаляется. Замеры часового расхода топлива проводятся в следующей последовательности.

1. Устанавливается аппаратура расходомера согласно монтажной схеме (см. рисунок 3.9).
2. Запускается и прогревается двигатель до рабочей температуры  $82^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  в режиме холостого хода.
3. Водитель автомобиля устанавливает соответствующий установившийся нагрузочный режим.
4. Проводится замер расхода топлива.
5. Результаты измерений заносятся в таблицу 3.3.
6. Производится сброс показаний расходомера.
7. Повторяются операции 3-6 для остальных нагрузочных режимов.
8. Двигатель останавливается. На выпускной коллектор устанавливается и герметично закрепляется экспериментальное КУСТ ОГ.
9. Повторяются операции 2-7 с установленным КУСТ.
10. Двигатель останавливается. Аппаратура расходомера демонтируется.

Нагрузочный режим задаётся, начиная со 150 кВт с интервалом 15 кВт.

Таблица 3.3 - Результаты замера расхода топлива

Мощность N, кВт	Температура воздуха, Т, К	Атмосферное давление, Р, Па	Расход топлива, G <sub>T</sub> , кг/ч
150			
135			
...			
30			
15			

### 3.2.6 Измерение давления отработавших газов

Перепад давления между входом ОГ в КУСТ и их выходом определялся жидкостным манометром (рисунок 3.10), который устанавливался соответственно.

Работа прибора основана на уравнивании водяного столба жидкости  
измеряемым давлением.

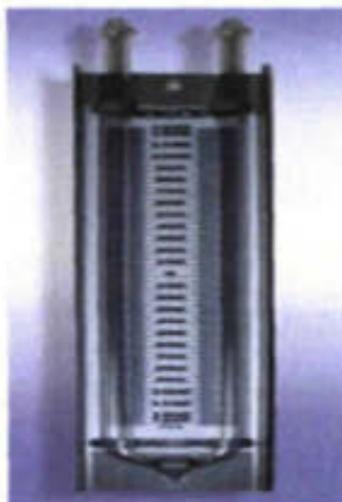


Рисунок 3.10 - Жидкостный U-образный манометр

Измерение давления проводилось в следующей последовательности:

1. Жидкостный манометр подсоединяется к выпускному коллектору ДВС.
2. Двигатель запускается и прогревается до рабочей температуры  $82^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
3. Водитель автомобиля устанавливает соответствующий установившийся нагрузочный режим.
4. Проводится замер давления по прибору.
5. Результаты заносятся в таблицу 3.4
6. Операции 3-5 повторяются для каждого нагрузочного режима.
7. ДВС останавливается, манометр отсоединяется.
8. На выпускной коллектор устанавливается и закрепляется КУСТ ОГ.
9. Жидкостный манометр подсоединяется к выходу КУСТ.
10. Операции 2-6 повторяются.

11. Двигатель останавливается, манометр отсоединяется.

Нагрузочный режим устанавливается, начиная со 150 до 0 кВт с интервалом 15 кВт.

Таблица 3.4 - Результаты замера падения давления в КУСТ

Мощность N, кВт	Температура воздуха, Т, К	Атмосферное давление, Р, Па	Расход топлива, $\Delta p$ , Па
150			
135			
...			
30			
15			

### 3.2.7 Измерение температуры отработавших газов

Для измерения температуры ОГ на входе и выходе КУСТ использовался измеритель портативный (ИТП-2) (рисунок 3.11). Диапазон измерения 0...1000°C.

1



Рисунок 3.11 - Общий вид ИТП-2

Прибор работает с термоэлектрическим преобразователем (термопара) по ГОСТ Р 8.585-2001 и обеспечивает измерение температуры по двум каналам.

Измерение температуры ОГ осуществляется в следующей последовательности:

1. ИТП-2 устанавливается на выходе выпускного коллектора ДВС.
2. Двигатель запускается и прогревается до рабочей температуры  $82^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
3. Переводится переключатель электронного блока в положение «I».
4. Водитель автомобиля устанавливает соответствующий установившийся нагрузочный режим.
5. Фиксируется показание прибора и результат заносится в таблицу 3.5.
6. Операции 4 и 5 повторяются для всех нагрузочных режимов.
7. Переключатель электронного блока ИТП-2 переводится в положение «0», двигатель останавливается.
8. На выпускной коллектор устанавливается и закрепляется КУСТ.
9. Измерительный зонд прибора вставляется на выходе КУСТ.
10. Операции 2-6 повторяются.
11. Переключатель электронного блока ИТП-2 переводится в положение «0», двигатель останавливается.

Измерения проводятся, начиная со 150 до 0 кВт с интервалом 15 кВт.

Мощность N, кВт	Температура воздуха, T, К	Атмосферное давление, P, Па	Расход топлива, T <sub>ог</sub> , К
150			
135			
...			
30			
15			

### 3.2.8 Определение коэффициента загрязнения сетки

Для определения коэффициента загрязнения сетки определялись потери давления в устройстве с установленной новой сеткой и с

загрязнённой сеткой, а также измерялась масса новой сетки и загрязнённой при каждом испытании.

Для обеспечения доверительной вероятности 0,95 и ошибке  $\varepsilon \approx \pm 3\sigma$  опыты повторялись 3 раза. Измерения проводились при максимальной мощности ДВС на установившемся режиме. Замеры параметров проводились при наработке ДВС, начиная с установки нового КУСТ до максимального срока службы устройства, что позволило определить поправочный коэффициент в реальных условиях эксплуатации устройства [35].

Для проведения испытаний были взяты две идентичные новые сетки, жидкостный манометр и лабораторные весы CBL120H.

Испытания проводились в следующей последовательности.

Обе сетки поочередно взвешиваются, устанавливаются в КУСТ в качестве нижнего ограничителя слоя катализатора, проводится замер противодействия в КУСТ для каждой сетки. Одна из сеток устанавливается в КУСТ и эксплуатируется до наработки 50 моточасов, при которой проводится первый опыт. Затем верхняя часть корпуса КУСТ разбирается и удаляется катализатор и его верхняя ограничительная решётка для того, чтобы исключить влияние их засорённости на потери давления в КУСТ.

Проводится замер масс новой сетки и эксплуатируемой сетки. Затем загрязнённая сетка устанавливается на место в КУСТ, который собирается без катализатора и верхней решётки. Проводится замер противодействия в КУСТ. Затем загрязнённая сетка извлекается и устанавливается новая сетка. Проводится замер противодействия. Все измеренные значения заносятся в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 - Результаты испытания металлической сетки

Наработка, мото-часы	Противодавление новой сетки, $\Delta p_c^H$ , кПа	Противодавление загрязнённой сетки, $\Delta p_c^3$ , кПа	Масса новой сетки, $m_c^H$ , г	Масса загрязнённой сетки, $m_c^3$ , г	Температура воздуха, Т, К	Атмосферное давление, Р, Па
0						
50						
...						
450						
500						

Новая сетка снимается и устанавливается загрязнённая. КУСТ собирается вместе с катализатором и верхней решёткой для создания реальных условий загрязнения сетки. Устройство эксплуатируется до следующей контрольной наработки. Операции по измерению параметров повторяются.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

### 4.1 Результаты стендовых исследований

Результаты проведённых исследований приведены в приложении А.

Изучение зависимостей изменения топливно-экономических показателей дизеля КАМАЗ-740 с экспериментальным КУСТ при изменении его нагрузочных режимов позволяет оценить влияние конструктивных параметров исследуемой конструкции на эксплуатационные показатели дизеля (тяговые, скоростные, топливной экономичности и др.).

На рисунках 4.1, 4.2, и 4.3 представлены зависимости расхода топлива, давления ОГ и температуры ОГ от используемой мощности ДВС.

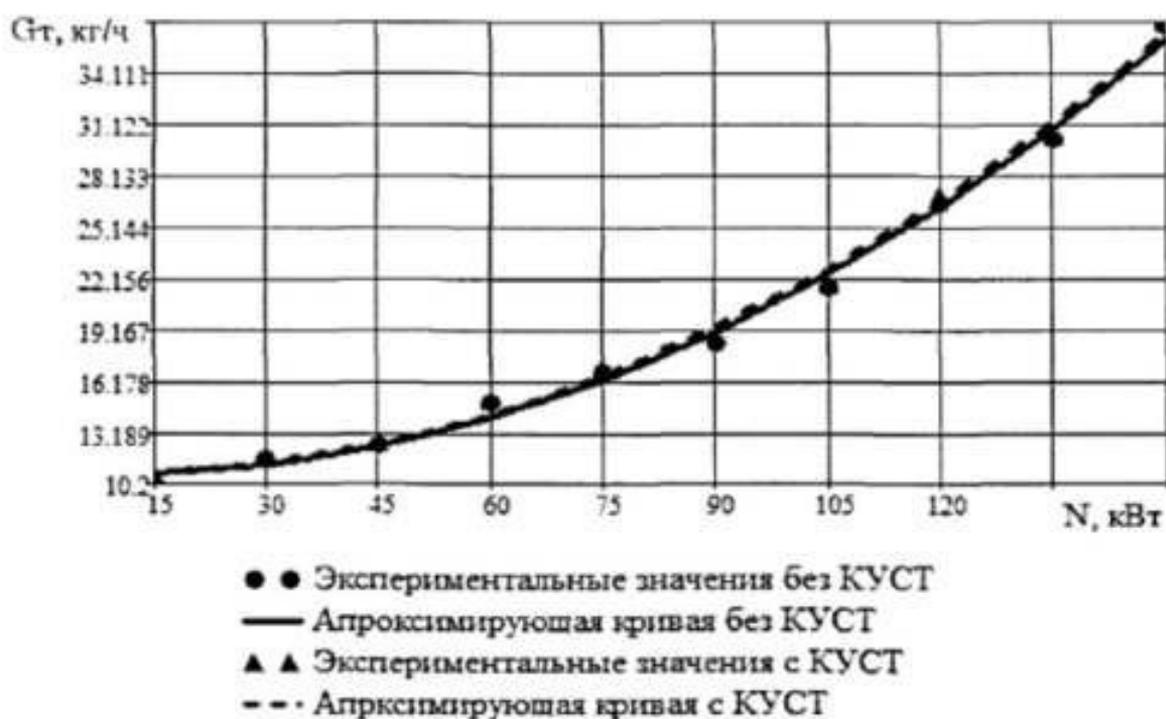


Рисунок 4.1- Зависимость расхода топлива от используемой мощности  
ДВС

Из рисунка 4.1 видно, что с установкой КУСТ ОГ расход топлива возрастает на 1,1%. Это происходит вследствие появления дополнительных сопротивлений на выходе отработавших газов. В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии:

- без КУСТ  $G_T(N) = 10,952 - 0,027 \cdot x + 1,291 \cdot 10^{-3} \cdot x^2$ ;
- с КУСТ  $G_T^{КУСТ}(N) = 10,845 - 0,021 \cdot x + 1,271 \cdot 10^{-3} \cdot x^2$ .

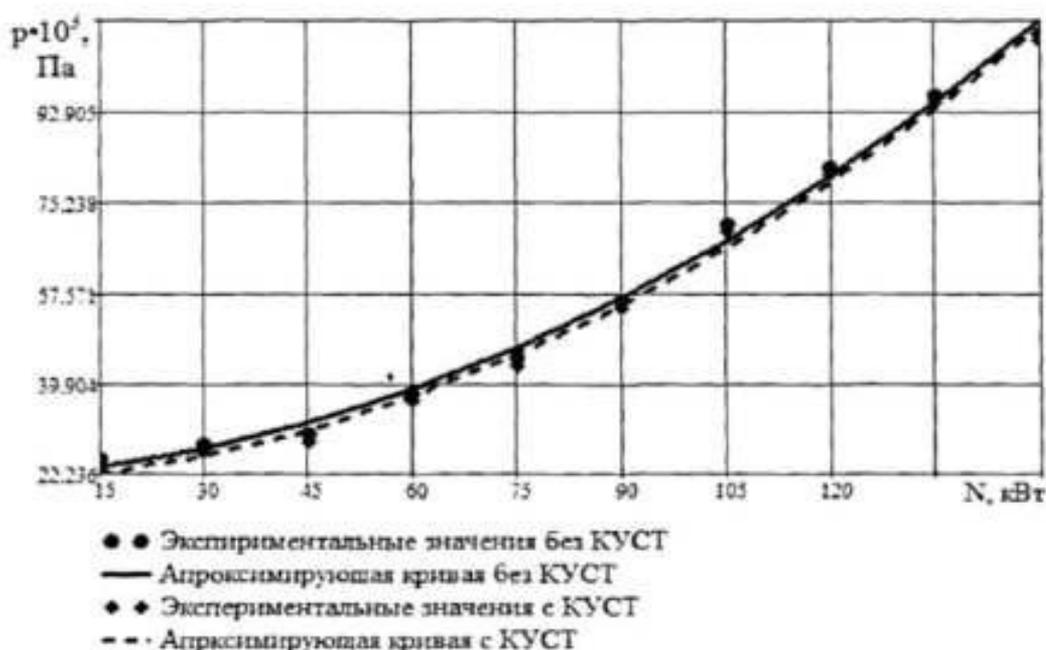


Рисунок 4.2 - Зависимость давления ОГ от используемой мощности ДВС

Из анализа графика (рисунок 4.2) видно, что давление ОГ возрастает с увеличением мощности. Установка КУСТ ОГ приводит к потерям давления, которые с увеличением используемой мощности возрастают, вследствие увеличения скорости движения ОГ. Уравнения регрессии зависимости давления ОГ от используемой мощности ДВС имеют вид:

- без КУСТ  $p_{OG}(N) = 21720 + 79,747 \cdot x + 3,418 \cdot x^2$ ;
- с КУСТ  $p_{OG}^{КУСТ}(N) = 20290 + 78,293 \cdot x + 3,431 \cdot x^2$ .

Зависимость температуры ОГ на входе и выходе КУСТ от используемой мощности ДВС (рисунок 4.3) практически линейна и определяется следующими факторами: увеличением количества сжигаемого топлива, интенсивностью теплопередачи от КУСТ во внешнюю среду и повышением давления ОГ перед устройством снижения токсичности.

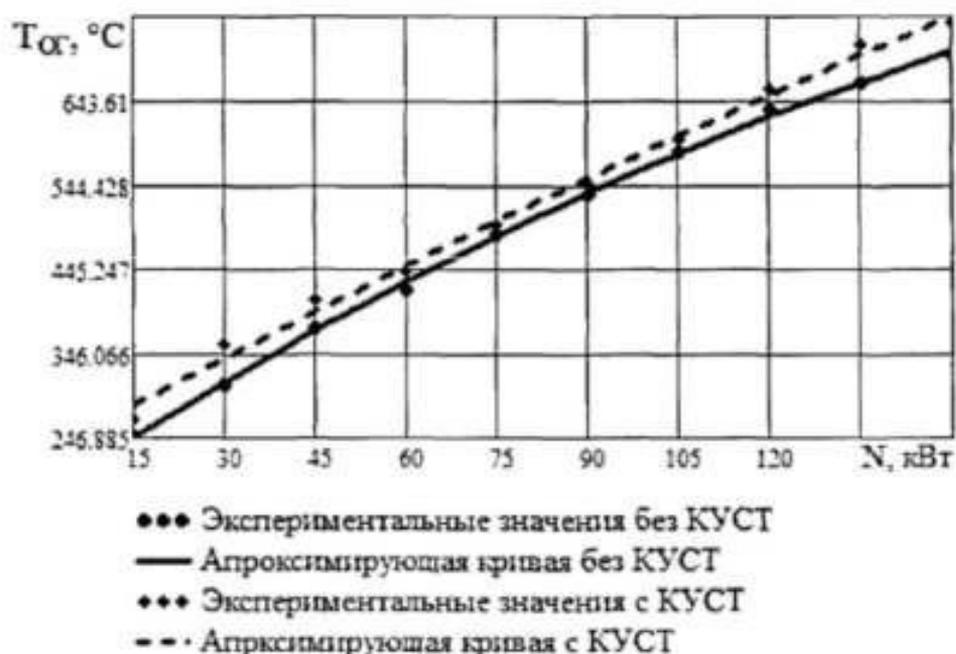


Рисунок 4.3 - Зависимость температуры ОГ от используемой мощности ДВС

Уравнения регрессии имеют вид:

- без КУСТ  $T_{ог}(N) = 178,975 + 4,643 \cdot x - 7,722 \cdot 10^{-3} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $T_{ог}^{КУСТ}(N) = 225,883 + 3,91 \cdot x - 3,094 \cdot 10^{-3} \cdot x^2$ .

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 4.1-4.3, позволяет сделать вывод, что установка устройства очистки приводит к увеличению температуры ОГ в среднем на 5,5%, увеличению расхода топлива на 1,1% и снижению давления ОГ на 2,4%.

Результаты исследований зависимостей изменения токсичности ОГ от используемой мощности ДВС представлены на рисунках 4.4, 4.5, 4.6 и 4.7.

Анализ изменения концентрации оксида углерода (CO) (рисунок 4.4) показывает, что с ростом мощности концентрация CO увеличивается с 0,092 г/м<sup>3</sup> до 0,303 г/м<sup>3</sup> за счёт неполноты сгорания топлива и снижения длительности процесса. Концентрация оксидов углерода на выходе КУСТ ниже на 15-57%, чем на входе, особенно в области высоких нагрузок двигателя и при больших температурах ОГ, что способствует лучшему сгоранию оксидов углерода ]

После обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии:

- без КУСТ  $C_{CO}(N) = 0,079 + 7,986 \cdot 10^{-4} \cdot x + 4,529 \cdot 10^{-6} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $C_{CO}^{КУСТ}(N) = 0,083 + 1,209 \cdot 10^{-4} \cdot x + 1,246 \cdot 10^{-6} \cdot x^2$ .

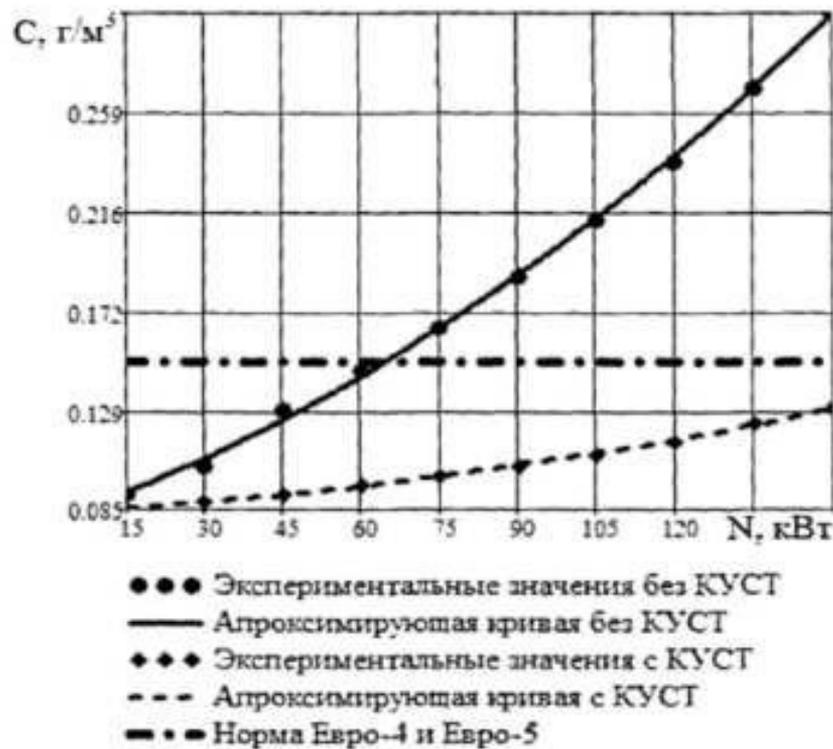


Рисунок 4.4 - Зависимость концентрации CO в ОГ от используемой мощности двигателя

Анализ изменения концентрации оксидов азота (рисунок 4.5) показывает, что с ростом нагрузки на ДВС их концентрация возрастает практически линейно и имеет наибольшее значение при максимальной нагрузке, причём на режимах высокой нагрузки концентрация  $NO_x$  увеличивается более резко. Это связано с тем, что с увеличением мощности ДВС и уменьшением коэффициента избытка воздуха происходит недожог топлива, что способствует образованию оксидов азота. Из рисунка 4.5 следует, что КУСТ ОГ более эффективно работает при нагрузках более 40% ]

Уравнения регрессии имеют вид:

- без КУСТ  $C_{NO_x}(N) = 0,11 + 6,75 \cdot 10^{-4} \cdot x + 5,875 \cdot 10^{-6} \cdot x^2$ ;
- с КУСТ  $C_{NO_x}^{КУСТ}(N) = 0,088 + 4,307 \cdot 10^{-4} \cdot x + 6,566 \cdot 10^{-6} \cdot x^2$ .

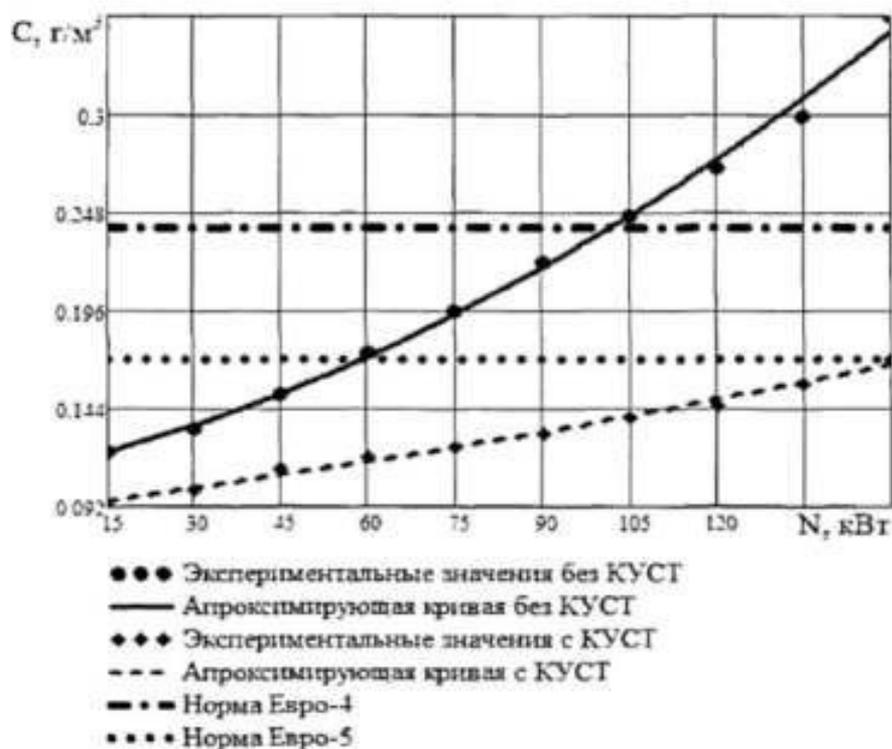


Рисунок 4.5 - Зависимость концентрации  $NO_x$  в ОГ от используемой мощности двигателя

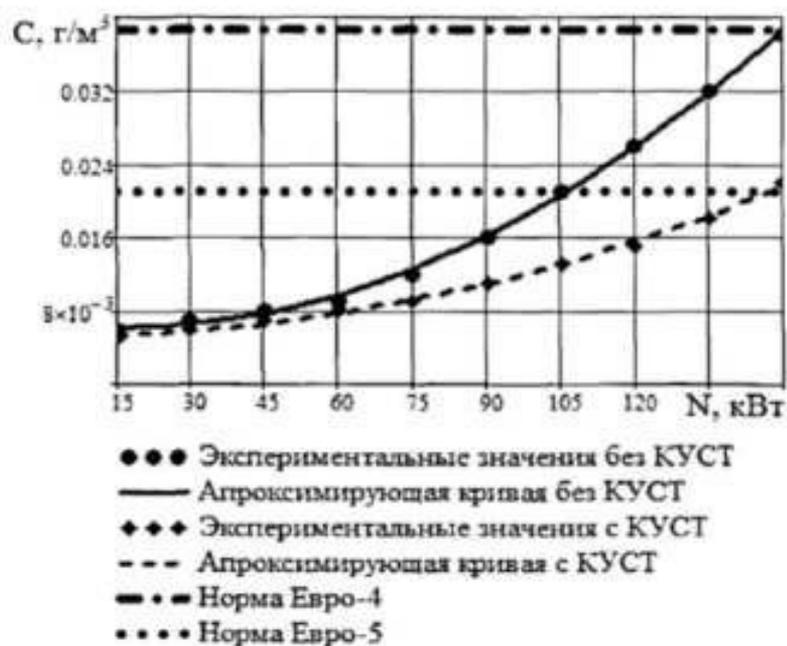


Рисунок 4.6 - Зависимость концентрации углеводородов в ОГ от используемой мощности двигателя

Из рисунка 4.6 видно, что концентрация углеводородов в ОГ при повышении нагрузки на двигатель возрастает от  $0,006 \text{ г/м}^3$  до  $0,038 \text{ г/м}^3$  то есть выбросы СН на максимальной мощности в шесть раз больше, чем на минимальной нагрузке. Такой характер зависимости объясняется увеличением расхода топлива, и, соответственно, повышением количества углеводородов, выделяющихся при сгорании топлива в камере сгорания ].

Уравнения регрессии имеют вид:

- без КУСТ  $C_{\text{СН}}(N) = 6,567 \cdot 10^{-3} - 5,485 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1,785 \cdot 10^{-4} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $C_{\text{СН}}^{\text{КУСТ}}(N) = 5,35 \cdot 10^{-3} - 6,212 \cdot 10^{-6} \cdot x + 7,576 \cdot 10^{-4} \cdot x^2$ .

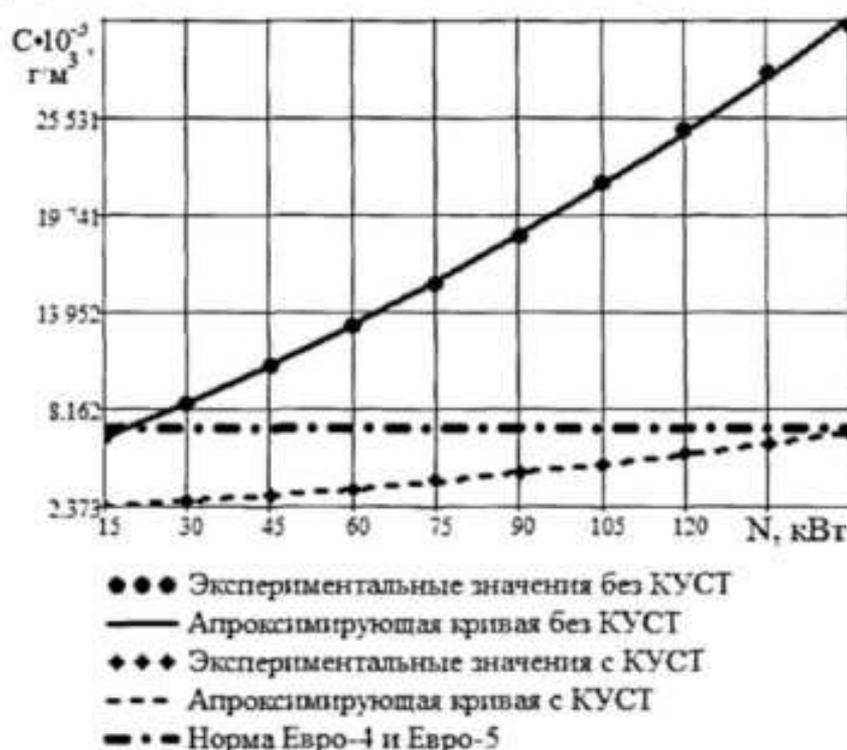


Рисунок 4.7 - Зависимость концентрации сажи в ОГ от используемой мощности двигателя

Анализ зависимости (рисунок 4.7) показывает, что с увеличением используемой мощности ДВС концентрация сажи в ОГ возрастает практически линейно. Это связано с недогоранием топлива в камере сгорания. Концентрация сажи увеличивается с  $0,007$  до  $0,031 \text{ г/м}^3$  (в 4,5 раза) без КУСТ и с  $0,002$  до  $0,007$  (в 3,5 раза) с КУСТ. На выходе КУСТ, в

зависимости от увеличения нагрузки концентрация сажи изменяется в меньшем диапазоне, так как в зоне высоких температур сажа лучше сгорает.

Зависимости концентрации сажи от нагрузки ДВС имеют вид:

- без КУСТ  $C_c(N) = 4,587 \cdot 10^{-3} + 1,196 \cdot 10^{-4} \cdot x + 3,906 \cdot 10^{-7} \cdot x^2$ ;

- с КУСТ  $C_c^{КУСТ}(N) = 2,1 \cdot 10^{-3} + 1,677 \cdot 10^{-5} \cdot x + 9,428 \cdot 10^{-7} \cdot x^2$ .

В таблице 4.1 приведено сравнение содержания токсичных веществ в ОГ двигателя КАМАЗ-740, полученных при исследовании, с нормами [21].

Таблица 4.1 — Сравнение содержания токсичных составляющих в ОГ дизельных ДВС с нормативными

Токсичный компонент	Нормативы			ДВС КАМАЗ-740		
	Евро-III	Евро-IV	Евро-V	Без КУСТ	Прототип	С КУСТ
CO, г/кВт·ч	2,10	1,50	1,50	3,71	1,78	1,48
CH, г/кВт·ч	0,66	0,46	0,26	0,46	0,42	0,25
NO <sub>x</sub> , г/кВт·ч	5,00	3,50	2,00	4,31	2,67	1,94
C, г/кВт·ч	0,127	0,08	0,08	0,38	0,137	0,076

Таким образом, экспериментальные исследования изменения концентраций токсичных компонентов показали, что разработанное КУСТ эффективно снижает выбросы основных токсичных компонентов ОГ, а степень эффективности изменяется в зависимости от режима работы ДВС.

Применение устройства очистки ОГ позволяет выполнять нормы Евро-V по всем токсичным компонентам, а на данный момент в РФ действуют нормы Евро-IV[12]. Средняя степень очистки ОГ от вредных веществ составляет: по CO - 60%, по CH - 45%, по NO<sub>x</sub> - 55% и по саже - 80%.

Результаты исследования изменения массы металлической сетки за счёт загрязнённости и потерь давления ОГ в процессе наработки ДВС (приложение Ж) представлены на рисунках 4.8 и 4.9.

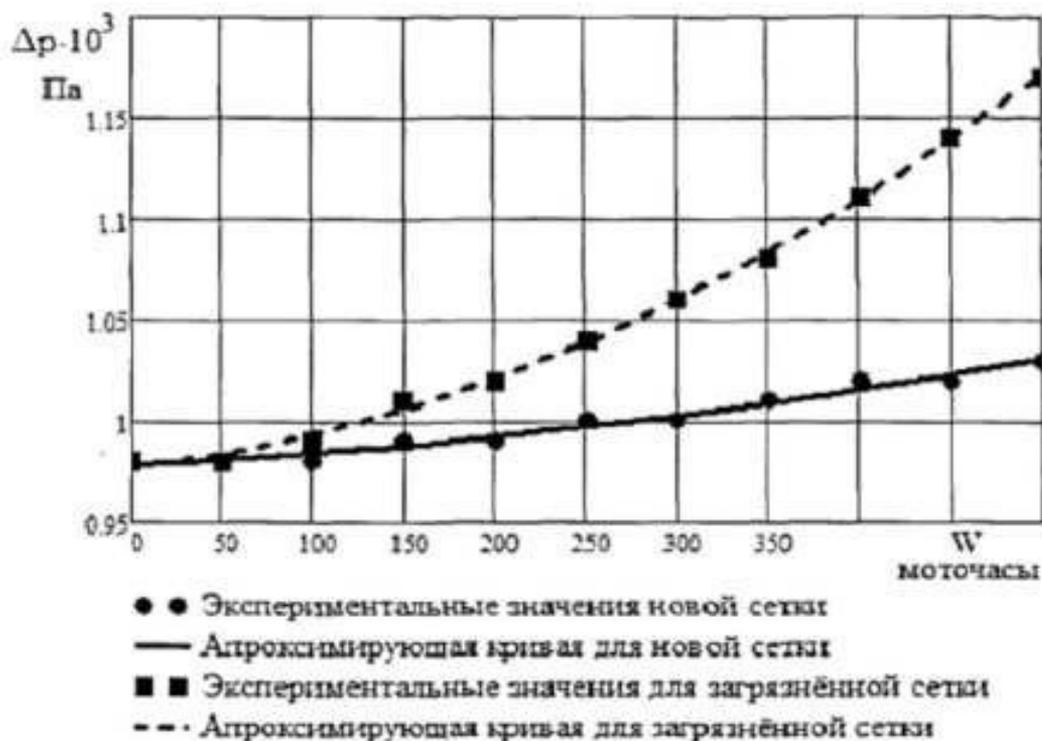


Рисунок 4.8 - Зависимость потерь давления ОГ от наработки ДВС

Потери давления ОГ при использовании загрязнённой сетки в комбинированном устройстве снижения токсичности возрастают с увеличением наработки ДВС. Это происходит из-за загрязнения проходного сечения сетки вследствие окисления и нагара за время наработки, что препятствует поступлению ОГ в катализатор, а также ухудшается процесс его регенерации и таким образом приводит к снижению эффективности работы устройства.

Уравнение регрессии для новой сетки имеет вид:

$$\Delta p(W) = 0,978 + 4,951 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1,119 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 .$$

Уравнение регрессии для загрязнённой сетки имеет вид:

$$\Delta p(W) = 0,977 + 1,052 \cdot 10^{-4} \cdot x + 5,641 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 .$$

Из рисунка 4.9 видно, что при наработке 250-400 мото­часов масса сетки резко возрастает, так как нагар интенсивно нарастает и закрывает проходное сечение.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$m(W) = 15,317 - 1,208 \cdot 10^{-4} \cdot x + 1,991 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 .$$

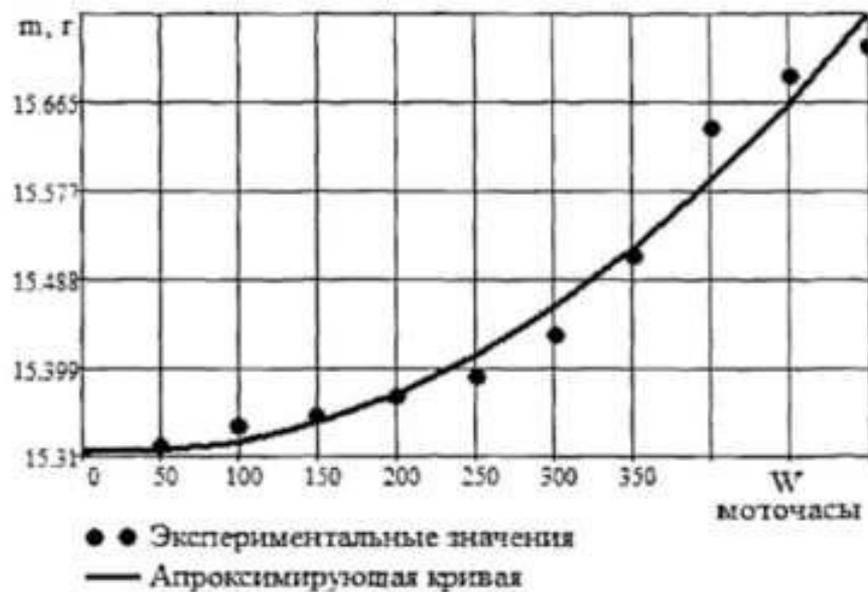


Рисунок 4.9 - Зависимость массы загрязнённой сетки от наработки ДВС

Таким образом, коэффициент загрязнения сетки определяется не только сравнением её массы с новой сеткой, но и должны учитываться условия загрязнения. В нашем случае поправочный коэффициент составил  $k = 0,868 \pm 0,0043$  [35].

#### 4.2 Выводы

Проведённые стендовые и эксплуатационные исследования показали высокую эффективность предлагаемой конструкции устройства очистки ОГ. Использование КУСТ практически не оказывает воздействия на мощностные и топливно-экономические показатели ДВС, за счет низкого противодавления. В результате испытаний установлено:

1. КУСТ приводит к увеличению температуры ОГ в среднем на 5,5%, расхода топлива на 1,1% и снижению давления ОГ на 2,4%;
2. Степень очистки ОГ от вредных веществ составляет: по СО — 60%, по СН - 45%, по NO<sub>x</sub> - 55% и по саже - 80%. Применение устройства позволяет выполнять нормы Евро-V по всем токсичным компонентам,

3. Коэффициент загрязнения сетки определяется не только сравнением её массы с новой сеткой, но при этом необходимо учитывать условия загрязнения (скорость, температуру и состав ОГ). При исследованиях поправочный коэффициент составил  $k = 0,868 \pm 0,0043$ ;

4. Максимальная эффективность работы КУСТ достигается при следующих его параметрах:

- диаметр реактора  $D_p = \text{ОД } 18 \text{ м}$ ,
- высота реактора  $H_p = 0,144 \text{ м}$ ,
- диаметр гранул катализатора  $d = 0,008 \text{ м}$ ,

5. При наработке ДВС более 450 моточасов (18000 км) работа КУСТ становится неэффективной, поэтому для продления эффективности работы нейтрализатора необходимо выполнять комплекс операций.

## **5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ**

### **5.1 Методика расчёта экономического эффекта устройства очистки**

В настоящее время задача обеспечения экологической безопасности воздушного бассейна является первостепенной, поэтому вредным выбросам автотракторной техникой уделяют серьёзное внимание. В то же время стоит задача сохранения энергоресурсов.

Предлагается усовершенствованная методика расчёта экономического эффекта использования устройства очистки на ТС и целесообразности его применения на основании показателей качества очистки ОГ и энергоёмкости устройства снижения токсичности.

Новизна методики заключается в установлении последовательности расчёта экономической эффективности устройства очистки ОГ и целесообразности его применения.

Экономическая эффективность рассчитывается исходя из условий изменения выплат за загрязнение воздушного бассейна страны.

Плата за загрязнение окружающей природной среды взимается с предприятий, учреждений, организаций и других юридических лиц, не учитывая их форму собственности и организационно-правовую форму, на которой они созданы. Также совместные предприятия с участием иностранных юридических лиц, которым предоставлено право заниматься производственно-хозяйственной деятельностью на территории Российской Федерации [12].

Плата за загрязнение выражается материальным возмещением экономического ущерба от выбросов загрязняющих веществ ОГ в окружающую среду Российской Федерации, которая идёт на компенсацию воздействия выбросов загрязняющих веществ ОГ и стимулирование снижения или поддержание выбросов в пределах нормативов. Также плата за загрязнение идёт на затраты проектирования и строительства

природоохранных объектов и текущие затраты, связанные с содержанием и эксплуатацией сооружений, предназначенных для охраны природы: золоуловителей, фильтров и других природоохранных объектов [47].

Базовые нормативы платы за выбросы загрязняющих веществ ОГ определяются, как сумма произведений удельного экономического ущерба от выбросов  $i$ -го загрязняющего вещества ОГ на показатели относительной опасности  $i$ -го загрязняющего вещества ОГ для окружающей природной среды и здоровья населения и на коэффициенты индексации платы [6].

$$P_H = \sum_{i=1}^m \Delta_{yi} \cdot A_i \cdot \alpha,$$

где  $P_H$  - базовая нормативная плата за выбросы загрязняющих веществ ОГ, руб/т;

$\Delta_{yi}$  - удельный экономический ущерб от выбросов  $i$ -го компонента, руб/усл.т.;

$A_i$  - показатель относительной опасности  $i$ -го загрязняющего вещества ОГ, усл.т/т;

$\alpha$  - коэффициент индексации,

$m$  - количество компонентов.

Показатели относительной опасности веществ  $A_i$  рассчитываются на основе нормативных документов "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест" и "Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения" [47]

$$A_i = a_i \cdot \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \delta_i \cdot \lambda_i$$

где  $a_i$  - поправка, характеризующая относительную опасность присутствия примеси в воздухе, вдыхаемом человеком.  $ПДК_i$  дня атмосферного воздуха принимается предельно допустимая концентрация среднесуточная (ПДКсс);

$\alpha_i$  - поправка, учитывающая вероятность накопления исходной примеси или вторичных загрязнителей в компонентах окружающей среды, а

также учитывающая возможность поступления примеси в организм человека неингаляционным путем;

$\beta_i$  - поправка на вероятность образования из исходных примесей, выброшенных в атмосферу, вторичных загрязнителей, более опасных, чем исходные (для легких углеводородов);

$\delta_i$  - поправка, характеризующая вредное воздействие примеси на остальных реципиентов (кроме человека);

$\lambda_i$  - поправка на вероятность вторичного выброса примесей в атмосферу после их оседания на поверхность (для пыли).

Показатель  $a_i$  задаёт уровень опасности  $i$ -го вещества для человека к уровню опасности оксида углерода (II) и определяется по формуле [47]:

$$A_i = \sqrt{\frac{\text{ПДК}_{\text{СС}(\text{CO})} \cdot \text{ПДК}_{\text{р.з}(\text{CO})}}{\text{ПДК}_{\text{СС}(i)} \cdot \text{ПДК}_{\text{р.з}(i)}}} = \sqrt{\frac{60(\text{мг}^2/\text{м}^6)}{\text{ПДК}_{\text{СС}(i)} \cdot \text{ПДК}_{\text{р.з}(i)}}$$

где  $\text{ПДК}_{\text{СС}(i)}$  - среднесуточная предельно допустимая концентрация  $i$ -го вещества,  $\text{мг}/\text{м}^3$  [8],

$\text{ПДК}_{\text{р.з}(i)}$  - предельно допустимая концентрация  $i$ -го вещества в рабочей зоне.

При отсутствии  $\text{ПДК}_{\text{СС}}$  применяется предельно допустимая максимально разовая концентрация ( $\text{ПДК}_{\text{Мр}}$ ), при отсутствии  $\text{ПДК}_{\text{СС}}$  и  $\text{ПДК}_{\text{Мр}}$  применяется ориентировочный безопасный уровень воздействия (ОБУВ) [8].

Коэффициенты индексации платы определяются по единой методике, учитывающей изменение уровня цен на природоохранное строительство и другие направления природоохранной деятельности. Для расчета коэффициента индексации платы определяется структура использования платежей за загрязнение окружающей природной среды на данный период по направлениям [12]:

- природоохранные мероприятия, требующие капитальных вложений;
- научно-исследовательские работы природоохранного назначения;

- другие природоохранные мероприятия.

Исходя из этого, определяются соотношения удорожания по сравниваемым периодам:

- капитальных вложений;
- стоимости научно-исследовательских работ;
- других природоохранных мероприятий.

Коэффициент индексации платы определяется как средневзвешенная величина соотношений удорожания по сравниваемым периодам с учетом сложившейся структуры использования платежей.

Дифференцированные ставки платы за загрязнение определяются умножением базовых нормативов платы, утверждаемых Министерством охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ и согласованных с Министерством экономики РФ и Министерством финансов РФ, на коэффициенты, учитывающие экологические факторы по территориям [17].

$$C_{\Pi} = \Pi_{Н} \cdot k ,$$

где  $C_{\Pi}$  - ставка платы за загрязнение атмосферы вредными выбросами ОГ, руб/т;

$\Pi_{Н}$  - базовая нормативная плата за выбросы загрязняющих веществ ОГ, руб/т;

$k$  - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости атмосферы в данном регионе.

Коэффициенты экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха на территории Российской Федерации вводятся для учета суммарного воздействия, оказываемого выбросами загрязняющих веществ на данной территории (таблица 5.1) [19].

При отсутствии утвержденных базовых нормативов платы за загрязняющие вещества ставки платы устанавливаются следующим образом [12]:

1) по загрязняющим веществам, ПДК (ОБУВ) которых определено в соответствующих нормативных документах словом "отсутствие", нормативы

платы устанавливаются на уровне базовых нормативов платы за наиболее опасные загрязняющие вещества и умножаются на коэффициенты, учитывающие экологические факторы;

Таблица 5.1 - Коэффициенты экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха экономических районов РФ

Экономический район Российской Федерации	Коэффициент экологической ситуации и экологической значимости, $k$
Северный	1,4
Северно-Западный	1,5
Центральный	1,9
Волго-Вятский	1Д
Центрально-Черноземный	1,5
Поволжский	1,9
Северо-Кавказский	1,6
Уральский	2,0
Западно-Сибирский	1,2
Восточно-Сибирский	1,4
Дальневосточный	1,0

2) по загрязняющим веществам, которые имеют ПДК (ОБУВ), но не включены в состав утвержденных базовых нормативов платы, последние устанавливаются территориальными органами Министерства природы России и утверждаются в соответствии с законодательством органами исполнительной власти.

Исходными данными для определения фактической массы выброса (сброса) могут служить:

- данные лабораторных исследований (испытаний, экспериментов);
- данные о расходе топлива;
- данные о временном режиме работы ДВС за год;

Особенности определения массы загрязнений, поступающих в атмосферу:

- при определении валового выброса учитывается нормативное время работы источников загрязнения атмосферы;
- при определении фактического выброса в расчетах берется фактическое время работы оборудования за год;
- в случае простоя технологического оборудования, источник загрязнения атмосферы может считаться отсутствующим;
- если в выбросах содержатся вещества, трансформирующиеся в атмосфере воздуха в более токсичные (например, переход  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$ ), то расчет ведется по более токсичным веществам с уменьшением их количества по коэффициенту трансформации. Если этот коэффициент неизвестен, то на время до его выяснения условно принимается полное превращение вещества выброса в более токсичное.

Плата за загрязнение для ДВС определяется произведением суммы годовых выбросов каждого компонента на ставку платы за загрязнение атмосферы [15]:

$$P_z = \sum_{i=1}^n M_i \cdot C_{\text{п}}, \quad (5.1)$$

где  $M_i$  - годовой выброс  $i$ -го компонента ОГ, т/год;

$C_{\text{п}}$  - ставка платы за загрязнение атмосферы ОГ, руб/т;

$n$  - количество загрязняющих веществ, ед.

Определение платы за загрязнение атмосферного воздуха по выражению (5.1) достаточно сложно и трудоёмко, так как необходимо определять годовые выбросы каждого вредного компонента ОГ. Для исключения расчета годового выброса загрязняющих веществ с ОГ предлагается использовать удельную плату, тогда выплата за загрязнение атмосферы будет определяться произведением массового годового расхода топлива ДВС на удельную плату за выбросы загрязняющих веществ при использовании 1-й тонны топлива [13]:

$$P_3 = G_T - Y_{II} - T_H - D_{p.g.} \cdot 10^{-2}, \text{руб/год} \quad (5.2)$$

где  $G_T$  - средний массовый расход топлива, кг/ч,

$Y_{II}$  - удельная плата за выбросы загрязняющих веществ ОГ, руб/т,

$T_H$  - время работы транспортного средства в день, ч/дн.;

$D_{p.g.}$  - количество рабочих дней в году, дн/год.

Удельная плата для различных видов топлив в 2012 году представлена в таблице 5.2 [25].

Таблица 5.2 - Удельная плата за загрязнение атмосферного воздуха

Вид топлива	Удельная плата за загрязнение атмосферы, руб/т или руб/м
Бензин этилированный АИ-92	38,0
Бензин этилированный А-76, 72	25,0
Бензин неэтилированный АИ-92	10,0
Бензин неэтилированный А76, 72	11,0
Дизельное топливо	21,0
Сжатый природный газ	9,0
Сжиженный газ	11,0

При отсутствии данных о количестве израсходованного топлива плата за выбросы загрязняющих веществ от транспорта определяется по типам ТС из расчёта ожидаемых условий и места их эксплуатации [25]. Годовая плата за одно ТС представлена в таблице 5.3 [25]

Таблица 5.3 - Годовая плата за загрязнение атмосферы по типу ТС

Тип транспортного средства	Годовая плата, тыс. руб/год
Легковой автомобиль	2,7
Грузовой автомобиль и автобус с бензиновым ДВС	4,0
Автомобили на газовом топливе	1,4
Грузовой автомобиль и автобус с дизелями	2,5
Строительно-дорожные машины и с/х техника	0,5

При определении общего годового экономического эффекта использования устройства очистки ОГ необходимо учесть, что его установка приводит как к положительному эффекту в виде снижения токсичности ОГ, так и к отрицательному - в виде повышения расхода топлива за счёт увеличения противодавления в системе выпуска, а также изменению затрат на его производство и эксплуатацию. Поэтому общий годовой экономический эффект применения устройства очистки ОГ будет определяться как сумма экономического эффекта от снижения токсичности ОГ и эффекта от изменения затрат на устройство за вычетом экономического ущерба от повышения противодавления [10]:

$$\mathcal{E}_r^{Общ} = \mathcal{E}_r^{\Delta G} + \mathcal{E}_r^H - \mathcal{E}_r^{\Delta p}, \quad (5.3)$$

где  $\mathcal{E}_r^{\Delta G}$  - экономический эффект, полученный за счёт снижения токсичности ОГ, руб;

$\mathcal{E}_r^H$  - экономический эффект, полученный за счёт изменения затрат на производство и эксплуатацию устройства очистки ОГ, руб;

$\mathcal{E}_r^{\Delta p}$  - экономический ущерб, полученный в результате увеличения расхода топлива, за счёт повышения противодавления на выпуске ДВС, руб.

Годовой экономический эффект (ущерб) использования устройства очистки ОГ в выпускной системе ДВС будет определяться разницей между платой за загрязнение атмосферы вредными веществами ОГ ДВС без него и платой за загрязнение ОГ с использованием устройства:

$$\mathcal{E}_r = P_3 - P_3^H, \quad (5.4)$$

где  $P_3$  - плата за загрязнение атмосферы ОГ ДВС без устройства, руб/год;

$P_3^H$  - плата за загрязнение атмосферы ОГ ДВС с установленным устройством, руб/год.

Преобразуем выражение (5.4) с учётом формулы (5.2), используя коэффициент эффективности нейтрализатора [10]:

$$\text{Э}_Г = k_i \cdot G_T \cdot Y_{II} \cdot T_H \cdot D_{p.r.} \cdot 10^{-2},$$

где  $k_i$  - коэффициент, учитывающий  $i$ -й вид эффекта устройства очистки.

Для ДВС без устройства очистки  $k_i = 0$  и экономический эффект (ущерб) равен 0.

Коэффициент экономической эффективности устройства очистки  $k_э$ , характеризуется степенью снижения количества загрязняющих веществ в ОГ и определяется как отношение разности их количества на входе и выходе из него к количеству загрязняющих веществ ОГ на его входе [10]:

$$k_э = \frac{G_{OГ} - G_{OГ}^H}{G_{OГ}}, \quad (5.5)$$

где  $G_{OГ}$  - количество загрязняющих веществ ОГ на входе в устройство очистки, кг/ч;

$G_{OГ}^H$  - количество загрязняющих веществ ОГ на выходе устройства очистки, кг/ч.

Коэффициент экономического ущерба устройства очистки ОГ, выражается через степень изменения противодавления в выпускной системе и определяется отношением разности давлений ОГ на входе и выходе из него к давлению на его входе [10]:

$$k_y = \frac{p_{OГ} - p_{OГ}^H}{p_{OГ}}, \quad (5.6)$$

где  $p_{OГ}$  - давление ОГ на входе в устройство, Па;

$p_{OГ}^H$  - давление ОГ на выходе из устройства, Па.

Тогда годовой экономический эффект от снижения количества загрязняющих веществ в ОГ ДВС с учётом (5.5) составит:

$$\begin{aligned} & \text{Э}_Г^{AG} \\ &= \frac{G_{OГ} - G_{OГ}^H}{G_{OГ}} \cdot G_T \cdot Y_{II} \cdot T_H \cdot D_{p.r.} \cdot 10^{-2}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

Для экспериментального КУСТ по формуле (5.7):

$$\mathcal{E}_r^{\Delta G} = \frac{777 - 462,2}{777} \cdot 20,16 \cdot 21 \cdot 8 \cdot 256 \cdot 10^{-2} = 3513 \text{ руб.}$$

Для прототипа:  $\mathcal{E}_r^{\Delta G} = 2861$  руб.

Годовой экономический ущерб от повышения противодавления в системе выпуска ОГ с учётом (5.6) составит:

$$\begin{aligned} & \mathcal{E}_r^{\Delta p} \\ &= \frac{p_{ог} - p_{ог}^H}{p_{ог}} \cdot G_T \cdot Y_{п} \cdot T_H \cdot D_{p.r.} \cdot 10^{-2}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

Для экспериментального КУСТ по формуле (5.8):

$$\mathcal{E}_r^{\Delta p} = \frac{57,9 \cdot 10^3 - 56,5 \cdot 10^3}{57,9 \cdot 10^3} \cdot 20,16 \cdot 21 \cdot 8 \cdot 256 \cdot 10^{-2} = 210 \text{ руб.}$$

Для прототипа  $\mathcal{E}_r^{\Delta p} = 97$  руб.

Экономический ущерб, обусловленный внедрением устройства очистки определяется суммой затрат на его производство и обслуживание:

$$Z_H = Z_{п} + Z_э, \quad (5.9)$$

где  $Z_{п}$  - годовые затраты на производство устройства очистки ОГ, руб;

$Z_э$  - годовые затраты на эксплуатацию устройства очистки ОГ.

$$Z_{п} = Z_{п}^{уд} \cdot \sum S_i, \quad (5.10)$$

где  $Z_{п}^{уд}$  - удельные годовые затраты на производство одного устройства очистки ОГ, руб/м<sup>2</sup>. При расчётах удельные затраты принимаются согласно [1, 19], учитывая индекс потребительских цен на 01.01.2012 года, значит  $Z_{п}^{уд} = 23216,1$  руб/м<sup>2</sup>.

$\sum S_i$  - суммарная площадь поверхности всех элементов конструкции устройства очистки ОГ, м. В расчётах для КУСТ  $\sum S_i = 0,1046$  м<sup>2</sup>.

Для экспериментального КУСТ по формуле (5.10):

$$Z_{п} = 23216 \cdot 0,1046 = 2428 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на эксплуатацию устройства очистки ОГ определяются по формуле [1, 19]:

$$Z_э = Z_э^{уд} \cdot \frac{G_{ог}^H}{\rho} \cdot \Delta p \cdot T_H, \quad (5.11)$$

где  $Z_3^{yA}$  - удельные годовые затраты на эксплуатацию одного устройства очистки ОГ, руб/кВт·ч. При расчётах удельные затраты принимаются согласно [1, 19], учитывая индекс потребительских цен на 01.01.2012 года, значит  $Z_3^{yA} = 133,5$  руб/(кВт·ч);

$\rho$  - плотность отработавших газов, кг/м<sup>3</sup>. В расчётах  $\rho = 0,7$  кг/м<sup>3</sup> (таблица E1);

$\Delta p$  - потери давления в устройстве очистки ОГ, кПа;

Для экспериментального КУСТ по формуле (5.11):

$$Z_3 = 133,5 \cdot \frac{812,4}{0,7 \cdot 3600} \cdot 1,4 \cdot 8 = 482 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{КУСТ}} = 2428 + 482 = 2910 \text{ руб.}$$

Общий годовой экономический эффект использования КУСТ составит:

$$Z_{\Gamma}^{\text{ОБЩ}} = 3513 - 2910 - 210 = 393 \text{ руб.}$$

Так как затраты на изготовление и эксплуатацию прототипа согласно [1, 19] с учётом индекса потребительских цен на 01.01.2012 года составляют 2731 руб, тогда годовой экономический эффект прототипа составит:

$$Z_{\Gamma}^{\text{ОБЩ}} = 2861 - 2731 - 97 = 33 \text{ руб.}$$

Если выражения (5.7), (5.8) и (5.9) разделить на расход топлива, то получим удельный годовой экономический эффект, получаемый от 1 кг израсходованного топлива, который зависит от удельных показателей качества очистки ОГ и энергоёмкости устройства [30]:

$$Z_{\Gamma}^{\Delta G} = q_{\Delta G} \cdot G_{\Gamma} \cdot Y_{\Pi} \cdot T_{\text{Н}} \cdot D_{\text{р.г.}} \cdot 10^{-2},$$

$$Z_{\Gamma}^{\Delta p} = q_{\Delta p} \cdot G_{\Gamma} \cdot Y_{\Pi} \cdot T_{\text{Н}} \cdot D_{\text{р.г.}} \cdot 10^{-2}.$$

Тогда общий удельный годовой экономический эффект КУСТ составит:

$$Z_{\Gamma}^{\text{ОБЩ}} = 100,4 - 83,14 - 6 = 11,26 \text{ руб/(кг/ч)}.$$

Срок окупаемости затрат на производство и монтаж устройства очистки ОГ определяется их отношением к годовому экономическому эффекту без учёта затрат на изготовление КУСТ и его эксплуатацию:

$$T_{ок} = \frac{З_{п}}{\mathcal{E}_{Г}^{\Delta G} - \mathcal{E}_{Г}^{\Delta P}},$$

Срок окупаемости для КУСТ составит:

$$T_{ок}^{КУСТ} = \frac{2428}{3513 - 210} = 0,74 \text{ года.}$$

Для прототипа срок окупаемости равен:

$$T_{ок}^{прототип} = \frac{2249}{2861 - 97} = 0,81 \text{ года.}$$

## 5.2 Оценка экономической эффективности устройства очистки

Для оценки экономической эффективности устройства очистки ОГ введём интегральный показатель целесообразности его применения и дадим определение.

Интегральный показатель целесообразности внедрения устройства очистки загрязняющих веществ ОГ ДВС характеризует экономическую эффективность устройства очистки, и показывает соотношение суммарного экономического эффекта (положительного эффекта), и суммы ущерба (отрицательного эффекта), полученных в результате использования устройства [30].

$$ИПЦ = \frac{\mathcal{E}_{Г}^{\Delta G}}{\mathcal{E}_{Г}^{\Delta P} + З_{н}}, \quad (5.12)$$

Здесь могут быть три варианта:

- если  $ИПЦ > 1$  - устройство снижения токсичности целесообразно применять и чем больше ИПЦ, тем выше общий годовой экономический эффект;

- если  $ИПЦ < 1$  - использование устройства очистки ОГ не целесообразно, так как общий экономический эффект отрицательный;

- если  $ИПЦ = 1$  - общий экономический эффект равен нулю, это показывает, что эффект, полученный за счёт снижения выброса загрязняющих веществ ОГ и затрат на устройство очистки, гасится ущербом,

получаемым за счёт увеличения расхода топлива, т.е. применение такого устройства не целесообразно.

Для экспериментального КУСТ ИПЦ по формуле (5.12) составляет:

$$\text{ИПЦ}_{\text{КУСТ}} = \frac{3513}{210 + 2910} = 1,13.$$

Для прототипа данный показатель будет равен:

$$\text{ИПЦ}_{\text{прототип}} = \frac{2861}{97 + 2731} = 1,01.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что использование КУСТ в дизельных ДВС транспортных средств, используемых в сельском хозяйстве, на нагрузочных режимах мощностью 150-220 кВт для очистки ОГ от токсичных компонентов до норм Евро-5 экономически целесообразно.

### 5.3 Выводы

1. Усовершенствование методики определения годового экономического эффекта в результате применения КУСТ и других аналогичных устройств состоит в том, что расчёт платы за загрязнение окружающей среды ОГ проводится не по массовым выбросам каждого токсичного компонента, а по количеству израсходованного топлива. Для экспериментального КУСТ годовой экономический эффект составил:  $\mathcal{E}_{\Gamma}^{\text{ОБЩ}} = 393$  руб., для прототипа 33 руб., удельный годовой экономический эффект -  $\mathcal{E}_{\text{удГ}}^{\text{ОБЩ}} = 11,26$  руб/(кг/ч). Срок окупаемости устройств: для КУСТ  $T_{\text{ок}}^{\text{КУСТ}} = 0,74$  года, для прототипа  $T_{\text{ок}}^{\text{прототип}} = 0,81$  года.

2. Обоснован коэффициент экономической эффективности применения КУСТ и других аналогичных устройств, характеризующий уровень снижения выброса загрязняющих веществ ОГ с одной стороны, а с другой - увеличение противодавления в устройстве очистки, приводящее к повышению расхода топлива.

3. Предложен интегральный показатель, по которому устанавливается целесообразность использования КУСТ и других аналогичных устройств,

дано его определение и расчётная формула, показывающая соотношение между положительными и отрицательными экономическими эффектами использования КУСТ. Для экспериментального КУСТ  $ИПЦ_{КУСТ}=1,13$ , для прототипа -  $ИПЦ_{прототип} = 1,01$  то есть применение КУСТ в качестве средства очистки ОГ дизелей мощностью 150-220 кВт от токсичных компонентов экономически целесообразно.

В приложениях представлены материалы, дополняющие выполненную работу и подтверждающие её достоверность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ существующих способов и средств снижения токсичности ОГ дизельных двигателей показал, что наиболее эффективным средством является комбинированное устройство снижения токсичности ОГ в выпускной системе ДВС, работа которого основана на вторичном дожиге отработавших газов.

Обоснована конструкция КУСТ на основании минимизации коэффициента газодинамического сопротивления, который составил:  $\xi_{\text{общ}} = 0,386$ .

2. В результате теоретических исследований КУСТ получена математическая модель описания газодинамических и физико-химических процессов, протекающих в нём. На основании новых введённых удельных показателей качества очистки ОГ и энергоёмкости средства очистки ( $q_{\Delta G} = 1,52 \text{ \%}/(\text{кг}/\text{ч})$  и  $q_{\Delta p} = 0,0221 \text{ \%}/(\text{кг}/\text{ч})$ ), установлена теоретически эффективность КУСТ.

3. Экспериментальные исследования КУСТ подтвердили результаты теоретических исследований для дизельных ДВС мощностью 150-220 кВт на нагрузочных режимах и позволили установить его оптимальные геометрические параметры:  $D_p = 0,118 \text{ м}$ ,  $H_p = 0,144 \text{ м}$ ,  $d_t = 0,008 \text{ м}$ .

Коэффициент загрязнения сетки определяется не только сравнением её массы с новой сеткой, но при этом необходимо учитывать условия загрязнения (температуру, скорость ОГ). При испытаниях поправочный коэффициент составил  $k = 0,868 \pm 0,0043$ .

4. Экспериментальные исследования показали, что установка КУСТ на дизельных двигателях мощностью 150-220 кВт позволяет получить на выходе устройства 0,076 г/(кВт·ч) сажи, 1,94 г/(кВт·ч) оксидов азота, 0,25

г/(кВт·ч) углеводородов и 1,48 г/(кВт·ч) оксидов углерода (II), то есть снизить содержание загрязняющих веществ в ОГ: CO - на 60%, CH - на 45%, NO<sub>x</sub> - на 55% и сажи - на 80% и отвечать нормам Евро-5 CO - 1,5 г/(кВт·ч), CH - 0,26 г/(кВт·ч), NO<sub>x</sub> - 2 г/(кВт·ч), C - 0,08 г/(кВт·ч) При этом снижается давление ОГ на 2,4%; увеличивается температура ОГ в среднем на 5,5% и расход топлива на 1,1%.

5. Производственные испытания экспериментального КУСТ подтвердили эффективность его работы. При наработке дизелей мощностью 150-220 кВт, установленных на автомобилях КАМАЗ, МАЗ и тракторах К-701, 500 моточасов содержание сажи в ОГ составило 0,0765 г/(кВт·ч), степень снижения дымности ОГ составила в среднем 80%.

После наработки 450 моточасов устройство работает неэффективно, поэтому рекомендуется при её достижении выполнять комплекс операций по восстановлению работоспособности КУСТ.

6. Усовершенствована методика определения экономической эффективности и целесообразности использования КУСТ и других аналогичных устройств. Годовой экономический эффект установки КУСТ на одном автомобиле составляет 393 руб., при окупаемости в 9 месяцев, а установка прототипа приводит к экономии в 33 руб. при сроке окупаемости 10 месяцев. ИПЦ<sub>КУСТ</sub> = 1,13 показывает, что применение КУСТ на дизелях мощностью 150-220 кВт экономически целесообразно.

7. Комбинированное устройство можно применять на дизелях, используемых в сельском хозяйстве, мощностью 150-220 кВт.

8. В перспективе испытание КУСТ необходимо провести на дизелях большей мощности, на стационарных силовых установках с дизельными двигателями, а также на бензиновых двигателях, используемых как в сельском хозяйстве, так и промышленности.

Повысить ресурс эффективной работы устройства, используя саморегенерацию катализатора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрельников, В.А. Повышение экологической безопасности автотракторных дизелей путём разработки и совершенствования методов и технических средств очистки отработавших газов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Стрельников Владимир Александрович. - Саратов, 2004. - 381 с.

2. Кульчицкий, А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей / А. Р. Кульчицкий. - М.: Академический проспект, 2004. - 155 с.

9. Истомин, С.В. Совершенствование очистки отработавших газов дизелей сельскохозяйственной техники при эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Истомин Сергей Викторович. - Саратов, 1998. - 171с.

10. Якубовский, Ю. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды / Ю. Якубовский. - М.: Транспорт, 1979. - 198 с.

11. Марченко, А.П. Токсичность отработавших газов дизеля при использовании топлив растительного происхождения / А.П. Марченко, А.П. Строков, А.Ф. Минак, А.А. Осетров, О.Ю. Линьков // Двигатели внутреннего сгорания. - Харьков.: Харьковский Политехнический Институт. - 2002. — №1. - С. 22-25.

12. Цыцын, В.И. Методы и системы снижения токсичности отработавших газов автотракторных двигателей : учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Механизация сел. хоз-ва» / В.И. Цыцын, В.А. Стрельников, Г.М. Легошин и др. ; М-во сел. хоз-ва и продовольствия РФ, Сарат. гос. аграр. ун-т им. Н.И. Вавилова. - Саратов: Сарат. ГАУ, 1998. - 140 с.

13. Automobile and Engine Technology, Eurogress, FEV-VKA, Aachen. - 2000.-2 vol. - 1384 p.p.

14. Об утверждении ГН 2.1.6.2309-07: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 19 декабря 2007 г. № 92.

15. Марков, В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габитов . - 2-е изд., доп. и перераб. - Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002 . - 376 с.
16. Гришин, А.П. Улучшение экологических показателей автотракторных дизелей путём применения нейтрализаторов отработавших газов: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Гришин Антон Павлович. - Саратов, 2002. - 192с.
17. Стрельников, В.А. Евро-4 - шаги навстречу / В.А. Стрельников // Грузовое и легковое автохозяйство. - 2001. - № 11. - С. 35-38.
18. Чернецов, Д.А. Токсичность отработавших газов дизелей и их антропогенное воздействие / Д.А. Чернецов // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. Вернадского. - Тамбов. 2010. -№ 10-12(31). - С. 54-59.
19. Истомин, С.В. Совершенствование очистки отработавших газов в выпускной системе дизеля / С.В. Истомин // Вести. Сарат. госагроун-та им. Н.И. Вавилова. - 2005. -№ 2. С. 47-51.
20. Чернецов, Д.А. Загрязнение окружающей среды сельскохозяйственной техникой / Д.А. Чернецов // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. Вернадского. - Тамбов. 2011. - № 1(32). - С. 23-27.
21. Черноиванов, В.И. Стратегия развития технического сервиса АПК / В.И. Черноиванов // Машинно-технологическая станция - М.: ГОСНИТИ, 2003. -№3. - С. 2-6.
22. Черноиванов, В.И. Фундаментальные исследования - основа инженерных прикладных технологий / В.И. Черноиванов // Труды ГОСНИТИ, Т. 103. М.: 2009. - 187 с.
23. Черноиванов, В.И. Индустрия наносистем и материалов: перспективы использования в сельском хозяйстве / В.И. Черноиванов, В.В. Бледных, А.Н. Косилов, Е.М. Басарыгина // Научно-аналитический обзор. - Москва- Челябинск, 2007. - 240 с.

24. Российский статистический ежегодник. 2011: Стат. сб./Росстат. - М., 2011. - 813 С., О текущей ситуации в агропромышленном комплексе Российской Федерации в сентябре 2011 г - // [www.mcx.ru](http://www.mcx.ru)

25. Сухиташвили, М.Д. Снижение вредных выбросов дизелей при эксплуатации автотракторной техники : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Сухиташвили Михаил Дмитриевич. - Саратов, 2002. - 155 с.

26. Амельченко, В.А. Снижение токсичных выбросов дизелей мобильной сельскохозяйственной техники при эксплуатации путем совершенствования очистки отработавших газов : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Амельченко Вячеслав Александрович - Саратов, 1997. - 180 с.

27. О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих веществ): Постановление Правительства Российской Федерации №609 от 12 октября 2005 г.

28. Чернецов, Д.А. Анализ процесса образования токсичных компонентов в камере сгорания дизельных двигателей / Д.А. Чернецов, В.П. Капустин // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. Вернадского. - Тамбов. 2011. - № 1(32).-С. 54-58.

29. Горбунов, В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. - М. : Изд-во Рос. ун-та дружбы народов, 1998. - 214 с.

30. Дмитриевский, А. Токсичность автомобильных двигателей / А. Дмитриевский // Осн. средства. - 2000. - № 2. - С. 89-93.

31. Цыпцын, В.И. Исследование дисперсного состава сажевых частиц ОГ и их сепарация в сажевом фильтре / В.И. Цыпцын, С.В. Истомин, С.А. Гиевой // Повышение эффективности эксплуатации транспорта: Межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. тех. ун-т., 2001. - С. 178-182.

32. Гутаревич, Ю.Ф. Охрана окружающей среды от загрязнения выбросами двигателей / Ю.Ф. Гутаревич. - Киев: Урожай. - 2002. - 223 с.

33. Чернецов, Д.А. Обоснование способа очистки отработавших газов автотракторных дизелей / Д.А. Чернецов, В.П. Капустин // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. Вернадского. - Тамбов. 2010. - № 7-9(30). - С. 3843.

34. Петров, А.А. Снижение вредных выбросов тракторного дизеля 44 11/12,5 путём рециркуляции отработавших газов: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03, 05.20.01. / Петров Алексей Александрович - Саратов, 2006. - 220 с.

35. Олейник, Д.О. Способ и устройство снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Олейник Дмитрий Олегович - Рязань, 2009. - 220 с.

30. Сайкин, А.М. Обоснование и разработка комплексных методов снижения загрязнения воздуха в кабинах карьерных самосвалов отработавшими газами дизелей : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.03, 05.04.02. / Сайкин Андрей Михайлович. - Москва, 2010. - 380 с.

31. Стрельников, В.А. Перспективы применения альтернативных топлив и присадок к ним для уменьшения токсичных выбросов ДВС / В.А. Стрельников, С.В. Истомина, А.И. Чербаев // Повышение эффективности эксплуатации транспорта: Межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. тех. ун-т., 2001. - С. 112-115.

32. Чернецов, Д.А. Влияние евротоплива на мобильную технику отечественного производства / Д.А. Чернецов, В.П. Капустин, Д.В. Доровских // Наука на рубеже тысячелетий : материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. - Тамбов: Изд-во ТАМБОВПРИНТ, 2009. - С. 88-89.

33. Рыблов, М.В. Улучшение эксплуатационных показателей тракторов обогащением воздушного заряда. : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Рыблов Михаил Владимирович - Пенза, 2009. - 170 с.

34. Чернецов, Д.А. Влияние эксплуатационных факторов дизельных ДВС на токсичность отработавших газов / Д.А. Чернецов, В.П. Капустин // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового

поколения для растениеводства и животноводства : XVI Междунар. науч.-практ. конф.: сб. науч. тр.: Изд-во Першина Р.В. -2011. - С. 312-315.

35. Капустин, В.М. Нефтяные и альтернативные топлива с присадками и добавками / В.М. Капустин, М.: КолосС, 2008. - 232 с.

36. Беляев, С.В. Топлива для современных и перспективных автомобилей: Учеб. пособие / С.В. Беляев, В.В. Беляев; ПетрГУ. - Петрозаводск, 2005. - 236с.

37. Веселов, В.Н. Использование природного газа как способ экологизации автомобильного транспорта / В.Н. Веселов, Ю.А. Веселова, М.Ю. Вишнякова // Вестник АГТУ. Технические науки: Астрахань, 2010. - №1(49) - С. 33-

38. Сибикин, Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учебное пособие / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. - 2-е изд., - М.: КНО- РУС, 2012.-240 с.

39. Булаткин, Г.А. Перспективы и ограничения производства биотоплива II поколения из растительного сырья /Г.А.Булаткин // Экологический вестник России, 2009. -№ 10. - С. 49-52.

40. Карпов, С.А. Биобутанол - биотопливо II поколения / С.А.Карпов // Нефтепереработка и нефтехимия, 2008. - №7. - С. 14-16.

41. Нагорнов, С.А. Техника и технологии производства и переработки растительных масел: учебное пособие / С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.В. Романцова, В.П. Таров - Тамбов: ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. - 53 с.

42. Уханов, А.П. Применение рапсового биотоплива в тракторных дизелях /А.П.Уханов, Н.С.Киреева //Механизация и электрификация сельского хозяйства,- 2008.-№ 5.-С.42-43.

43. Уханов, А.П. Рапсовое биотопливо /А.П. Уханов, В.А. Рачкин, Д.А. Уханов. - Пенза: РИО ПГСХА, 2008. - 229с.

44. Уханов А.П. Светлые нефтепродукты: способы получения, основные свойства и использование / А.П. Уханов, Ю.В. Гуськов, С.А. Нагорнов, А.Н. Зазуля. - Пенза: РИО ПГСХА, 2008. - 203с

45. Уханов, А.П. Биотопливо из рыжика /А.П.Уханов, Д.А.Уханов, В.А. Рачкин//Тракторы и сельхозмашины. -2011.-№ 2 - С. 8-11.

46. Голубев, В.А. Эффективность использования тракторного агрегата при работе на горчично-минеральном топливе: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03; 05.20.01 / Голубев Владимир Александрович. - Пенза, 2012. - 175 с.

47. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. - М.: Машиностроение, 1981 - 160 с.

48. Раменский, А.Ю., Шелищ П.Б., Нефедкин СИ, Рычаков А.А., Старостин М.В. Применение водорода на автомобильном транспорте: перспективы на российском рынке / А.Ю. Раменский, П.Б. Шелищ, СИ. Нефедкин, А.А. Рычаков, М.В. Старостин // Труды Международного Симпозиума по водородной энергетике. Москва, 1-2 ноября, МЭИ, 2005 - С. 169-174.

49. Раменский, А.Ю., Шелищ П.Б., Нефедкин СИ, Рычаков А.А., Старостин М.В. Перспективы и ближайшие задачи использования водорода автомобиле на Российском рынке / А.Ю. Раменский, П.Б. Шелищ, СИ. Нефедкин, А.А. Рычаков, М.В. Старостин // Международный форум. Водородные технологии для производства энергии. Тезисы докладов. 6-10 февраля. Москва, 2006 - С.221-222.

50. World-Wide fuel charter : December 1998. 45с.

51. World-Wide fuel charter : April 2000. 52с.

52. World-Wide fuel charter : December 2002. 51с.

53. World-Wide fuel charter : September 2006. 68с

54. Biodiesel guidelines From the Worldwide Fuel Charter Committee : April 2009.21с.

55. Тырнов, Ю.А. Повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов совершенствованием систем контроля режимов их работы: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01; 05.20.03 / Юрий Алексеевич Тырнов. - Саратов, 2001. -333 с.

56. Ерохин, М.Н. Нанотехнологии и наноматериалы в агроинженерии / М.Н. Ерохин, В.И. Балабанов, В.В. Стрельцов // Учебное пособие. Под ред. академика М.Н. Ерохина. - М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. - 300 с.

57. Черноиванов, В.И. Нанотехнологии - основа повышения качества обслуживания и ремонта машин / В.И. Черноиванов // сб. докладов Применение нанотехнологии и наноматериалов в АПК. - М.: ФГНУ «Росинформагротех». 2008. - 96 с.

58. Чернецов, Д.А. Способы нейтрализации отработавших газов в выпускной системе дизельных двигателей / Д.А. Чернецов, В.П. Капустин // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. Вернадского. - Тамбов. 2010. - №10-12(31).-С. 71-74.

59. Тришкин, И.Б. Основные параметры электрического фильтра / И.Б. Тришкин, Н.П. Стражев, Р.А. Солдатов, А.А. Феклисов // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. науч. тр. Междунар. науч. практ. конф. 13-14 мая 2010 г. - Мичуринск: Изд-во ФГОУ ВПО МичГАУ. - 2011. - С. 236-244.

60. Тришкин, И.Б. Устройства для очистки отработавших газов мобильных энергетических средств / И.Б. Тришкин, Д.О. Олейник // Инновационно-техническое обеспечение ресурсосберегающих технологий в АПК: сб. науч. тр. Междунар. науч. практ. конф. 4-5 мая 2009 г. - Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета. - 2010. - С. 144-148.

61. Гупта, А. Закрученные потоки / А. Гупта, Лиллид, Н. Сайред // пер. с англ. - М: Мир. - 1987. - 588 с.

62. Шагалова, С.Л. Исследование структуры кольцевых струй и факелов вихревых горелок в изотермических условиях / С.Л. Шагалова, Л.К. Соловьёв //Теплоэнергетика, 1983. - С. 31-35.

63. Щукин, В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил / В.К. Щукин // М: Машиностроение, 1970. - 331 с.

64. Халатов, А.А. Теория и практика закрученных потоков / А.А. Халатов // Отв. Ред. Долинский А.А. : АН УССР, Ин-т технич. Теплофиз. - Киев : Наукова, думка, 1989. - 192 с.

65. Волчков, Э.П. Турбулентный теплообмен в начальном участке трубы при закрутке потока / Э.П. Волчков, С.Ю. Спотарь, В.И. Терехов // Теплообмен - VI. - Минск, 1980. - Т.1. - С. 48-59.

66. Мухутдинов, Р.Х. Разработка каталитических нейтрализаторов для очистки отработавших газов и испытательных стендов / Р.Х. Мухутдинов, Н.А. Самойлов // Решение экологических проблем в автотракторном комплексе : Тез. докл. II Межд. науч.-техн. конф. - М : МАДИ(ТУ), 1998. - С. 51-53.

67. Мухутдинов, Р.Х. Методы и устройства сокращения выбросов вредных веществ на предприятиях автотранспортного комплекса / Р.Х. Мухутдинов Н.А. Самойлов, Р.Н. Хресткин // Экология автотранспортного комплекса : тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. - М : МАДИ(ТУ), 1996. - С. 57-60.

68. Мухутдинов, Р.Х. Теория и практика каталитической очистки отходящих газов / Р.Х. Мухутдинов, Н.А. Самойлов // УФА : Гилем, 2002. - 252 с.

69. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский // Изд. 6-е, перераб. и доп. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 840 с.

70. Идельчик, И.Е. Расчёт характеристик радиально-кольцевой струи в технологических аппаратах / И.Е. Идельчик // Аэродинамика химических производств с неподвижными слоями катализатора : АН СССР Ин-т катализа. Новосибирск : Наука, 1985. - 176 с.

71. Драганов, Б.Х. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания / Б.Х. Драганов, М.Г. Круглое, В.С. Обухова // Киев : Вища школа, 1987. - 174 с.

72. Kuper, P.F. Ultra-Low Power Electrically-Heated Catalyst System / P.F. Kuper, W. Maus, H Swars, R. Bruck, F.W. Kaiser // SAE International Congress

and Exposition Detroit, Michigan (Cobo Centr), February 28-March 3, 1994 : SAE Technical paper №940465, 1994. - P.8.

73. Gottberg, I. New Potential Exhaust Gas Aftertreatment Technologies for "Clean Car" Legislation / I. Gottberg, J.E. Rydquist, O. Backhand, S. Wallman, W. Maus, H. Swars, R. Bruck, F.W. Kaiser // SAE International Congress and Exposition Detroit, Michigan (Cobo Centr), February 25-March 1, 1991 : SAE Technical paper №910840, 1991.-P.7.

74. Schper, K. Diesel catalytic converter with hybrid substrate Structure / K. Schper, R. Konieczny, R. Bruck // Exhaust gas aftertreatment of diesel engine automobiles: Haus der Technik e. V., Essen 15 and 16 June, 1999. - P. 12\_\_

# **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Таблица А.1 - Соотношение единиц измерения дымности и концентрации сажи

Коэффициент ослабления, %	Коэффициент поглощения, м <sup>-1</sup>	Массовая концентрация, г/м <sup>3</sup>	Коэффициент ослабления, %	Коэффициент поглощения, м <sup>-1</sup>	Массовая концентрация, г/м <sup>3</sup>
10	0,25	0,033	30	0,83	0,133
11	0,27	0,038	31	0,86	0,138
12	0,30	0,042	32	0,90	0,144
13	0,32	0,047	33	0,93	0,150
14	0,35	0,052	34	0,97	0,156
15	0,38	0,057	35	1,00	0,162
16	0,41	0,062	36	1,04	0,168
17	0,43	0,066	37	1,07	0,174
18	0,46	0,071	38	1,10	0,181
19	0,49	0,076	39	1,15	0,187
20	0,52	0,081	40	1,19	0,193
21	0,55	0,086	41	1,23	0,199
22	0,58	0,091	42	1,27	0,206
23	0,61	0,096	43	1,31	0,213
24	0,64	0,101	44	1,35	0,220
25	0,67	0,106	45	1,39	0,227
26	0,70	0,111	46	1,43	0,234
27	0,73	0,117	47	1,48	0,241
28	0,76	0,122	48	1,52	0,248
29	0,80	0,127	49	1,57	0,256

Таблица Б1 - Результаты экспериментальных исследований

$N$ , кВт	$G_T$ , кг/ч	$p_{ог}$ , Па	$T$ , °C	$G_{ог}$ , кг/ч	$C(CO)$ , г/м <sup>3</sup>	$C(CH_4)$ , г/м <sup>3</sup>	$C(NO_x)$ , г/м <sup>3</sup>	$C(C)$ , г/м <sup>3</sup>	$C(O_2)$ , %
Без КУСТ									
15	10,2	$23,6 \cdot 10^3$	250,2	35 8,6	0,092	0,006	0,121	0,0066	18,2
30	11,6	$26,5 \cdot 10^3$	308,6	486,3	0,104	0,007	0,133	0,0085	18,1
45	12,5	$28,5 \cdot 10^3$	375,1	592,1	0,129	0,008	0,152	0,0107	17,8
60	14,9	$36,6 \cdot 10^3$	421,7	695,2	0,146	0,009	0,174	0,0131	17,5
75	16,7	$43,4 \cdot 10^3$	485,3	846,1	0,165	0,012	0,196	0,0156	17,1
90	18,4	$54,7 \cdot 10^3$	532,3	981,3	0,187	0,016	0,221	0,0184	16,8
105	21,6	$69,5 \cdot 10^3$	583,9	1086,5	0,212	0,021	0,246	0,0216	16,4
120	26,5	$80,6 \cdot 10^3$	632,6	1153,2	0,238	0,026	0,271	0,0248	15,8
135	30,2	$94,7 \cdot 10^3$	663,1	1217,6	0,270	0,032	0,298	0,0281	15,2
150	36,8	$106,6 \cdot 10^3$	698,6	1285,3	0,303	0,038	0,352	0,0310	14,7
С КУСТ									
15	10,2	$25 \cdot 10^3$	269,1	357,8	0,085	0,005	0,092	0,0024	18,1
30	11,7	$28 \cdot 10^3$	357,2	472,3	0,088	0,006	0,101	0,0027	18,0
45	12,6	$30 \cdot 10^3$	408,8	565,1	0,092	0,007	0,112	0,0030	17,7
60	15,0	$38 \cdot 10^3$	442,3	667,9	0,096	0,008	0,118	0,0034	17,5
75	16,9	$45 \cdot 10^3$	496,7	815,7	0,100	0,009	0,124	0,0039	17,0
90	18,7	$56 \cdot 10^3$	544,1	910,3	0,104	0,011	0,131	0,0044	16,5
105	21,9	$71 \cdot 10^3$	597,5	983,5	0,109	0,013	0,139	0,0049	15,9
120	27,0	$82 \cdot 10^3$	655,8	1047,1	0,115	0,015	0,146	0,0055	15,3
135	30,5	$96 \cdot 10^3$	709,2	1106,9	0,123	0,018	0,157	0,0061	14,8
150	37,1	$108 \cdot 10^3$	736,0	1196,9	0,130	0,022	0,170	0,0067	14,5

Таблица В1 - Физические параметры отработавших газов при нормальных атмосферных условиях

Температура, Т, °С	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент дина- мической вязкости, $\mu \cdot 10^{-6}$ , Па·с	Коэффициент ки- нематической вязкости, $\mu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
100	0,950	20,4	21,39
200	0,748	24,5	32,80
300	0,617	28,2	45,81
400	0,525	31,7	60,38
500	0,457	34,8	76,30
600	0,405	37,9	93,61
700	0,363	40,7	112,1

Таблица Г1 - Результаты исследования металлической сетки

Наработка, моточасы	Противодавление для новой сетки, $\Delta p_c^H$ , кПа	Противодавление для загрязнённой сетки, $\Delta p_c^3$ , кПа	Масса новой сетки, $m_c^H$ , г	Масса загрязнённой сетки, $m_c^3$ , г
0	0,98	0,98	15,308	15,310
50	0,98	0,98	15,308	15,315
100	0,98	0,99	15,310	15,336
150	0,99	1,01	15,309	15,352
200	0,99	1,02	15,310	15,374
250	1,00	1,04	15,310	15,388
300	1,00	1,06	15,311	15,432
350	1,01	1,08	15,312	15,510
400	1,02	1,11	15,311	15,637
450	1,02	1,14	15,312	15,685
500	1,03	1,17	15,312	15,722

