НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

УДК 621.43 На правах рукописи

К89

**КУКЕШЕВА АЛИЯ БАКИБАЕВНА**

**Разработка методики расчета конструкции и режима работы системы очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания**

8D071 – Инженерия и инженерное дело

8D07102 – Транспорт, транспортная техника и технологии

Диссертация на соискание степени

доктора философии (PhD)

Научные консультанты

доктор технических наук,

профессор

А.С. Кадыров

доктор технических наук,

профессор

Ш.М. Суюнбаев

Республика Казахстан

Караганда, 2024

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ** | 4 |
|  | **ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ** | 5 |
|  | **ВВЕДЕНИЕ** | 6 |
| **1** | **СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ** | 11 |
| 1.1 | Анализ конструкции и работы системы выпуска выхлопных газов автомоблей. | 11 |
| 1.2 | Физическая сущность процесса очистки газов электрическим разрядом | 23 |
| 1.3 | Физическая сущность процесса очистки газов ультразвуком | 31 |
| 1.4 | Анализ существующих конструкций работающих на основе электроимпульсного и ультразвукового метода очистки | 39 |
|  | Цель и задачи исследования | 48 |
|  | Выводы по первому разделу | 50 |
| **2** | **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ В ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ГЛУШИТЕЛЕ** | 51 |
| 2.1 | Анализ исследования работы электроимпульсного глушителя | 51 |
| 2.2 | Установление критерия оптимальности работы электроимпульсного глушителя | 57 |
| 2.3 | Установление параметров характеризующих режим работы электроимпульсного глушителя | 61 |
| 2.4 | Цель и задачи экспериментальных исследований на экспериментальных стендах электроимпульсного глушителя | 70 |
| 2.5 | Оборудование и измерительная аппаратура лабораторного стенда | 72 |
| 2.6 | План, методика проведения и предварительные результаты эксперимента на лабораторном стенде | 75 |
| 2.7 | Анализ полученных результатов экспериментальных исследований на лабораторном стенде | 78 |
| 2.8 | Оборудование и измерительная аппаратура полноразмерного стенда | 90 |
| 2.9 | План, методика проведения и предварительные результаты эксперимента на полноразмерном стенде | 93 |
| 2.10 | Анализ полученных результатов экспериментальных исследований на полноразмерном стенде | 97 |
|  | Выводы по второму разделу | 104 |
| **3** | **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ГЛУШИТЕЛЕ** | 106 |
| 3.1 | Исследование процесса очистки выхлопных газов в ультразвуковом глушителе | 106 |
| 3.2 | Установление критерия оптимальности и параметров режима работы ультразвукового глушителя | 112 |
| 3.3 | Цель и задачи экспериментальных исследований на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя | 120 |
| 3.4 | Оборудование и измерительная аппаратура полноразмерного стенда ультразвукового глушителя | 122 |
| 3.5 | План, методика проведения и предварительные результаты экспериментальных исследований на полноразмерном стенде | 124 |
| 3.6 | Анализ полученных результатов экспериментальных исследований на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя | 130 |
|  | Выводы по третьему разделу | 136 |
| **4** | |  | | --- | | **РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ** | | 138 |
| 4.1 | Сравнение электроимпульсного и ультразвукового глушителей | 138 |
| 4.2 | Пример методики расчета конструкции и режима работы электроимпульсного глушителя автомобиля | 143 |
| 4.3 | Пример методики расчета конструкции и режима работы ультразвукового глушителя автомобиля | 151 |
| 4.4 | Расчет экономической эффективности внедрения электроимпульсного глушителя | 157 |
| 4.5 | Расчет экономической эффективности внедрения ультразвукового глушителя | 160 |
| 4.6 | Техническое задание на проектирование опытной конструкции электроимпульсного глушителя | 162 |
| 4.7 | Техническое задание на проектирование опытной конструкции ультразвкового глушителя | 166 |
| 4.8 | Рекомендации по разработке опытного образца и регулировке режима работы электроимпульсного глушителя | 169 |
| 4.9 | Рекомендации по разработке опытного образца и регулировке работы ультразвукового глушителя | 171 |
|  | Выводы по четвертому разделу | 172 |
|  | **ЗАКЛЮЧЕНИЕ** | 174 |
|  | **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ** | 176 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ А** | 189 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ Б** | 193 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ В** | 197 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ Г** | 199 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕД** | 201 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ Е** | 203 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ Ж** | 205 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ З** | 206 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ И** | 207 |

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

СТ РК 2160-2011. Автотранспортные средства, оснащенные двигателями с воспламенением от сжатия. Дымность отработавших газов. Нормы и методы контроля при оценке технического состояния.

Кодекс Республики Казахстан. Экологический кодекс Республики Казахстан: принят 2 января 2021 года, №400-VI (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.05.2023 г.).

ГО С ТР 56162— 2014. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета выбросов от автотранспорта при проведении сводных расчетов для городских населенных пунктов.

ГОСТ 31830-2012. Электрофильтры. Требования безопасности и методы испытаний.

ГОСТ 28904-91 Системы управления электрофильтром. Общие технические требования и методы испытаний.

ГОСТ 23518-79 Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.

ГОСТ 14782-86 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.

ГОСТ 31328-2006. Шум. Руководство по снижению шума глушителями.

ГОСТ 305—82 Топливо дизельное. Технические условия.

ГОСТ 27578 – 2018. Газы углеводородные сжиженные для автомобильного транспорта.Технические условия

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДВС – двигатель внутреннего сгорания.

NOx – оксиды азота.

CO – угарный газ.

CO2 – углекислый газ.

CH – углеводород.

O2 – кислород.

*D2/D1* – соотношение показателей дымности газа после и до воздействия электроимпульсом/ультразвуком.

*f* – частота электроимпульса/ ультразвука, Гц.

ω – угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя, рад/с.

Δ – расстояние между электродами, м.

ТЧ 2,5 – первичные (мелкие) частицы газа размером менее 2,5 мкм.

ТЧ10 – первичные (круные) частицы газа размером менее 10 мкм.

НМЛОС – Неметановые летучие органические соединения

КПД – коэффициент полезного действия

EGR – Exhaust Gas Recirculation (от англ. – система рециркуляции

выхлопных газов)

DPF – Diesel Particulate Filter (от англ. – дизельный сажевый фильтр )

SCR – Selective Catalytic Reduction (от англ. – селективное

каталитическое восстановление )

PM - Particulate Matter (от англ. – твердые частицы)

Введение

Диссертация выполнена в рамках Государственной программы инфраструктурного развития Республики Казахстан «Нұрлы жол» на 2020- 2025 годы, на соискание степени доктора философии PhD по направлению подготовки 8D071 – «Инженерия и инженерное дело», образовательной программы докторантуры 8D07102 – «Транспорт, транспортная техника и технологии».

Транспортные средства, работающие на двигателях внутреннего сгорания (ДВС), несмотря на соблюдение установленных стандартов «Евро», продолжают выделять значительное количество вредных выбросов, таких как оксиды азота (NOx), углеводороды (HC) и углекислый газ (CO2) [1, 2]. В среднем 40-75% загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу, приходится на автотранспорт [3]. Эти выбросы приводят к дополнительному загрязнению окружающей среды, что ведет за собой образование смога, кислотных дождей и парниковых газов. Такие изменения в свою очередь, влияет на изменение климата, приводят к разрушению атмосферного слоя и способствует глобальному потеплению [4]. Также они негативно влияют на здоровье людей, приводя к развитию тяжелых и хронических заболеваний сердечно-сосудистой, легочной и других систем [5].

Проблема загрязнения воздуха выхлопными газами остается актуальной не только во всем мире, но и в Казахстане, который занимает 40 место в мировом рейтинге «IQAir» [6]. Среднегодовая концентрация твердых частиц в воздухе превышает нормы в 3-5 раз, особенно в городах, таких как Астана, Актобе, Усть-Каменогорск, Караганда, Балхаш и Жезказган [7]. Караганда занимает 23 место среди городов мира и 1 место среди городов Казахстана по уровню загрязнения воздуха, с превышением нормы более чем в 10 раз [8].

Для уменьшения загрязнености атмосферы применяются электромобили и водородные двигатели. В глушителях автомобилей размещают каталитические нейтрализаторы. Эффективность очистки катализаторами высокая, однако они дороги и имеют небольшой срок службы. Перспективно также создание глушителей на физических принципах воздействия ультразвука и электроимпульса на выхлопной газ в глушителе автомобиля.

В настоящее время для уменьшения уровня вредных выбросов и в улучшении экологических параметров автомобиля активно развивается направление, включающее в себя повышение эффективности работы и модернизации системы очистки выхлопных газов ДВС, за счет применения в ней электроимпульсных и ультразвуковых методов очисток в глушителе автомобиля. Эти методы несмотря на разные способы воздействия на газ имеют равносильное влияние на более мелкие частицы газа (за счет интенсификации процессов ионизиции и коагуляции) и способны повышать их степень очистки. Кроме того оборудование систем очисток электроимпульсным и ультразвуковыми глушителями не требует значительных финансовых затрат, не увеличивает габариты системы и не создает большую нагрузку на двигатель. Эти глушители могут быть успешно применены как при производстве новых автомобилей, так и при модернизации существующего автопарка. Перспективность и эффективность этих способов подтверждена в ряде теоретических и экспериментальных исследований [9,10,11,12].

Однако не решен вопрос оптимизации режима работы предлагаемых глушителей и выбора основных параметров его конструкции. В связи с этим исследования направленные на установление методов оптимального режима и особенностей конструкции являются **актуальными.**

**Гипотезой исследования** является предположение о возможности достижения оптимального режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей за счет регулирования основными параметрами, оказывающие влияние на степень очистки газа.

**Целью исследования** является получение экспериментальных и теоретических зависимостей, позволяющих разработать методику расчета конструкции и определить оптимальный режим работы системы очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи:**

1. проанализированы конструкции автомобильных глушителей и систем очистки выхлопных газов;

2. рассмотрена физическая сущность электроимпульсного и ультразвукового воздействия на выхлопной газ;

3. обоснован критерий оптимальности работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

4. методами теория подобия установлены параметры, описывающие режим и конструкцию электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

5. разработаны стенды для проведения экспериментов, описана методика и порядок исследования;

6. в результате совместного анализа теоретических зависимостей и экспериментальных данных установлены оптимальные диапозоны изменения параметров (числа оборотов двигателя, частоты ультразвука, расстояния между электродами, частоты электроимпульса и т.д.)

7. установлены области применения электроимпульсного и ультразвуового глушителей;

8. разработаны техническое задание, методика расчета и рекомендации по проектированию, применению и регулированию режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей.

Таким образом несмотря на то, что в работе рассматриваются два разных метода очистки выхлопного газа, тема диссертации объединена общей структурой проведения исследований, которая направлена на усовершенствовании работы системы очистки ДВС за счет разработки конструкций и определении оптимальных режимов работы электроимпульсных и ультразвуковых глушителей.

Также методически работа объединена одним объектом исследования и применяемыми методами.

**Методы исследования.** В диссертации использованы методы теории подобия и анализа размерностей, методы математической статистики, планирования и обработки эксперимента.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

- подтвержденавозможность достижения оптимального режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей за счет регулирования основными параметрами, оказывающие влияние на степень очистки газа: в частности изменения параметрами расстояния между электродами и частоты электроимпульса для электроимпульсного глушителя и параметрами частоты ультразвука для ультразвукового глушителя;

- впервые подтверждена гипотеза о существовании тесной связи между показателями дымности газа и параметрами светопоглощающей способоности, прозрачности и освещенности газа;

- экспериментальным путем получены регрессионные зависимости, описывающие изменение соотношения показателей дымности газа, (являющиеся критерием оптимальности работы электроимпульсного глушителя) от соотношения параметров частоты электроимпульса *f* к расстоянию между электродами Δ и угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя ω;

- экспериментальным путем получены регрессионные зависимости, описываюшие изменение соотношения показателей дымности газа (являющиеся критерием оптимальности работы ультразвукового глушителя) в зависимости от соотношения параметров частоты ультразвука *f* к угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя ω;

- получены критерии подобия, оценивающие эффективность работы и режимы течения потока газов в электроимпульсном и ультразвуковом глушителях;

- получены оптимальные значения параметров, описывающие конструкцию и регулирующие режимы работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- критерием оптимальности процессов очистки газов для исследуемых глушителей является отношение дымности газа до и после воздействия на него ультразвуком или электроимпульсом;

- предложенная система критериев подобия, описывает режим и конструкцию глушителей;

- установлены зависимости между дымностью выхлопного газа и его прозрачностью;

- зависимости, определяющие оптимальный диапозон изменения числа оборотов двигателя, расстояния между электродами и частоты электроимпульса для электроимпульсного глушителя и оптимальные диапозоны изменения параметров числа оборотов двигателя и частоты ультразвука для ультразвукового глушителя.

**Автор защищает:**

1. Способы очистки выхлопных газов ДВС автомобиля ультразвуком и электроимпульсом;

2. Методику расчета критериев подобия, описывающие работу электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

3. Методику расчета показателей дымности газа по взаимосвязи с параметром коэффциента поглощения света и по экспериментальным показателям освещенности газа;

4. Полученные результаты экспериментальных исследований;

5. Разработанные примеры методик расчета конструкции и определения оптимального режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

6. Техническое задание и рекомендации на проектирование опытного образца электроимпульсного и ультразвукового глушителей для системы очистки выхлопных газов двигателей автомобиля.

7. Полученные оптимальные значения параметров расстояния между электродами (Δ) и частоты электроимпульса (*f*) в зависимости от изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя (ω): при 79,5 рад/с (750 об/мин): Δ=0,008 м, *f* =23,04 Гц; при ω=130,9 рад/с (1280 об/мин) Δ=0,004 м, *f* =20,43 Гц; при ω=471 рад/с (4500 об/мин): Δ=0,0026 м, *f* =46,57 Гц;

8. Полученные оптимальные значения частоты ультразвука (*f*) в зависимости от изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя: при 79,5 рад/с (750 об/мин): *f* =13 кГц; при ω=272,63 рад/с (2600 об/мин) *f* =46 кГц; при ω=471 рад/с (4500 об/мин): *f* =79 кГц;

9. Оптимальные геометрические параметры (диаметр и длина) электроимпульсного и ультразвукового глушителей: d=0,27 м и L=0,32-0,4 м.

**Объектом исследования** является система очистки выхлопных газов двигателя автомобиля (электроимпульсный и ультразвуковой глушитель, предназначенный для очистки выхлопных газов).

**Предметом исследования** является процесс повышения степени очистки выхлопного газа, за счет регулирования параметрами, оказывающие влияние на эффективность работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей.

**Практическая значимость** заключается в разработке технического задания на опытные образцы электроимпульсного и ультразвукового глушителей для системы очистки выхлопных газов ДВС. В частности:

- составление примеров методики расчета конструкции и определения режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

- предложение эскизов и рекомендаций по проектированию и регулированию режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей.

Результаты исследований переданы в ТОО «ИНСТИТУТ ГРАДИЕНТ ПРОЕКТ» и внедрены в учебный процесс дисциплины «Классификация и устройство транспортной техники» для обучающихся бакалавриата 1 курса образовательной программы 6B07106 - «Транспорт, транспортная техника и технологии».

**Достоверность результатов диссертации** определяется примененными методами исследования: теория подобия и анализ размерностей, планирование эксперимента, проведение полноразмерных стендовых испытаний, применение современного оборудования. На начальном этапе исследования был установлен критерий оптимальности, рассчитаны критерии подобия, которые позволили оценить эффективность работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей и определить основные параметры конструкции и режима работы глушителя. Проведены экспериментальные исследования, по результатам которых установлена зависимость между показателями критерия оптимальности и регулируемыми параметрами, включая изменение угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя. Достоверность выводов диссертации обеспечивается корректной постановкой задач, применением адекватных методов и согласованием результатов экспериментов с аналитическими данными. Основные положения диссертации были опубликованы в научных статьях и тезисах докладов, а также имеется патент на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации прав на объекты авторского права.

**Все разделы диссертации выполнены в методической последовательности и логически взаимосвязаны.** Все задачи поставленные диссертантом решены, цель исследования достигнута. Практическая значимость и научная новизна соответствует поставленной цели, задачам и названию диссертации.

**Публикация и апробация работы.** Основные положения диссертации опубликованы в трех статьях, входящей в базу данных Scopus, в семи статьях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, в одном патенте на полезную модель РК, в одном свидетельстве о государственной регистрации прав на объекты авторского права и в трёх тезисах на международных научно-практических конференциях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа изложена на 208 страницах машинописного текста, состоит из обозначений и сокращений, введения, 4 разделов и заключения, включает в себя 93 рисунка, 54 таблиц , список использованных источников из 185 наименований и 9 приложений.

1 Состояние вопроса и задачи исследования

1.1 Анализ конструкции и работы системы выпуска выхлопных газов автомоблей

В наше время, в период стремительного развития автомобильной индустрии, вопрос загрязнение атмосферы становится одним из наиболее актуальных и критических проблем. С увеличением масштабов автотранспорта на мировом уровне выбросы загрязняющих веществ, содержащих вредные химические соединения, углеводороды и тяжелые металлы, значительно увеличились.

Среди наиболее опасных загрязнителей, которые исходят из выбросов автотранспорта, следует выделить твердые частицы, такие как черный углерод, первичные (мелкие) частицы размером 2,5 мкм и менее (ТЧ 2,5) и первичные (крупные) частицы размером 10 мкм и менее (ТЧ10) [13]. Вредными также являются оксиды азота (NOx) и неметановые летучие органические соединения (НМЛОС). Оксиды азота (NOx), особенно диоксид азота (NO2), ухудшают качество воздуха и влияют на здоровье людей. А оксиды НМЛОС способствуют образованию озона в атмосфере [14].

На рисунке 1.1 показаны основные источники выбросов и средние уровни загрязнителей. Эти загрязнители возникают как из выхлопных газов двигателя, так и в результате износа шин, тормозов и дорожного покрытия.

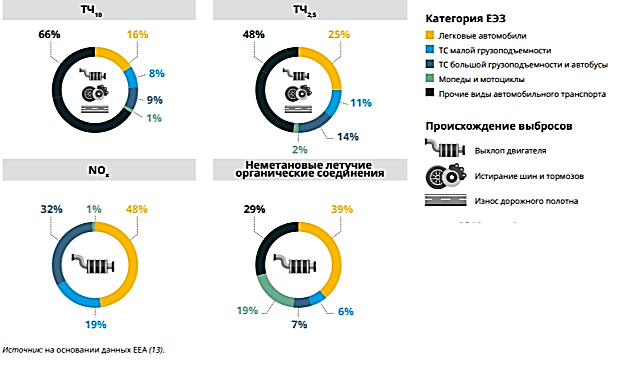


Рисунок 1.1 – Средние показатели выбросов от автомобильного транспорта в зависимости от типов загрязнения

Тем не менее согласно представленным данным следует, что основным происхождением всех выбросов является выхлоп двигателя автомобиля, который является источником образования всех видов загрязнителей: ТЧ10, ТЧ2,5, NOx и НМЛОС.

Загрязнение воздуха выхлопами автомобиля в свою очередь представляет собой серьезную угрозу для здоровья людей и является одной из главных причин увеличения показателей преждевременной смертности. Основной причиной смертности людей является возникновение различного рода заболениий из-за долгосрочного воздействия выхлопных газов на организм человека. Например, оксиды азота вызывают болезни с дыхательной системой. Многие из них трудно излечимы и имеют хронический характер, такие как, гайморит, ларинготрахеит, бронхит, бронхопневмония и рак легких. Кроме того, углеводороды и тяжелые металлы являются канцерогенными и вызывают атеросклероз сосудов головного мозга и проводят к различным нарушениям сердечно-сосудистой системы [15]. На рисунке 1.2 представлены основные уровни смертности и виды заболеваний, возникающих вследствии загрязнения воздуха выхлопными газами автомобилей.



Рисунок 1.2 – Основные уровни смертности и виды заболеваний, возникающих вследствии загрязнения воздуха выхлопными газами автомобилей.

Кроме того выбросы вредных веществ в атмосферу являются ключевым фактором, влияющим на изменение климата и экосистемы. К примеру, выбросы углекислого газа (CO2) повышает уровень загрязнения воды и почвы, а также способствует парниковому эффекту, приводя к глобальному потеплению и изменению климатических условий [16].

Последствия загрязнения атмосферы выхлопными газами также влечет за собой экономические потери, которые предусматривает расходы на лечение заболеваний и медицинское обслуживание, на возмещение экологического ущерба и наложению различного рода штрафов и санкций.

Следовательно проблема загрязнения воздуха выхлопными газами остается крайне актуальной в современном мире, включая Казахстан. Согласно мировому рейтингу «IQAir» Казахстан занимает 40-ое место среди 131 стран и регионов мира (таблица 1.1) с самыми загрязненными показателями воздуха.

Таблица 1.1 – Мировой рейтинг самых загрязненных стран и регионов мира

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Рейтинг | Страна/регион | 2023 | 2022 | 2021 | 2020 |
| 1 | Бангладеш | 79,9 | 65,8 | 76.9 | 77.1 |
| 2 | Пакистан | 73.7 | 70.9 | 66.8 | 59 |
| 3 | Индия | 54.4 | 53.3 | 58.1 | 51.9 |
| 4 | Таджикистан | 49 | 46 | 59.4 | 30.9 |
| 5 | Буркина-Фасо | 46.6 | 63 | -- | -- |
| 6 | Ирак | 43.8 | 80.1 | 49.7 | -- |
| 7 | Объединённые Арабские Эмираты | 43 | 45.9 | 36 | 29.2 |
| 8 | Непал | 42.4 | 40.1 | 46 | 39.2 |
| 9 | Египет | 42.4 | 46.5 | 29.1 | -- |
| 10 | Демократическая Республика Конго | 40.8 | 15.5 | -- | -- |
| 11 | Кувейт | 39.9 | 55.8 | 29.7 | 34 |
| 12 | Бахрейн | 39.2 | 66.6 | 49.8 | 39.7 |
| 13 | Катар | 37.6 | 42.5 | 38.2 | 44.3 |
| 14 | Индонезия | 37.1 | 30.4 | 34.3 | 40.7 |
| 15 | Руанда | 36.8 | 44 | -- | -- |
| 16 | Зимбабве | 33.3 | -- | -- | -- |
| 17 | Гана | 33.2 | 30.2 | 25.9 | 26.9 |
| 18 | Киргизия | 33.1 | 31.1 | 50.8 | 43.5 |
| 19 | Китай | 32.5 | 30.6 | 32.6 | 34.7 |
| 20 | Ливия | 30.4 | -- | -- | -- |
| 21 | Лаос | 29.6 | 27.6 | 21.5 | 22.4 |
| 22 | Вьетнам | 29.6 | 27.2 | 24.7 | 28 |
| 23 | Узбекистан | 28.6 | 33.5 | 42.8 | 29.9 |
| 24 | Гамбия | 28.5 | -- | -- | -- |
| 25 | Мьянма | 28.2 | 24.3 | 25.9 | 29.4 |
| 26 | Сенегал | 28.2 | 20.4 | -- | 11.2 |
| 27 | Босния и Герцеговина | 27.5 | 33.6 | 27.8 | 40.6 |
| 28 | Уганда | 27.3 | 39.6 | 27.6 | 26.1 |
| 29 | Эфиопия | 27 | 31.3 | 23.9 | 14.7 |
| 30 | Саудовская Аравия | 26.5 | 41.5 | 32.7 | 23.3 |
| 31 | Армения | 26.4 | 31.4 | 33.9 | 24.9 |
| 32 | Северная Македония | 25.2 | 25.6 | 25.4 | 30.6 |
| 33 | Замбия | 24.1 | 24.6 | -- | -- |
| 34 | Камерун | 24 | -- | -- | -- |
| 35 | Нигерия | 23.9 | 36.9 | 34 | -- |
| 36 | Таиланд | 23.3 | 18.1 | 20.2 | 21.4 |
| 37 | Камбоджа | 22.8 | 8.3 | 19.8 | 21.1 |
| 38 | Малайзия | 22.5 | 17.7 | 19.4 | 15.6 |
| 39 | Монголия | 22.5 | 29.5 | 33.1 | 46.6 |
| 40 | Казахстан | 22.2 | 23 | 31.1 | 21.9 |

По представленной таблице следует, что в рассматриваемый период в Казахстане среднегодовая концентрация твердых частиц в воздухе превышает в 3 – 5 раз. Более того, в большинстве городов Казахстана наблюдается серьезная проблема с избыточным загрязнением воздуха, при этом в некоторых населенных местах уровень загрязнения воздуха превышает установленные нормы в 8–10 раз [6].

В течение последних 5 лет такие города как, Астана, Актобе, Усть-Каменогорск, Караганда, Балхаш и Жезказган, страдают от устойчиво высокого уровня атмосферного загрязнения [7]. К примеру, город Караганда согласно мировому рейтингу «IQAir» занимает 23-ое место среди 7323 городов мира с самыми загрязненными показателями воздуха (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Мировой рейтинг самых загрязненных городов мира

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Рейтинг | Город | 2022 | 2021 |
| 1 | Лахор, Пакистан | 97.4 | 86.5 |
| 2 | Hotan, Китай | 94.3 | 101.5 |
| 3 | Бхивади, Индия | 92.7 | 106.2 |
| 4 | Дели (NCT), Индия | 92.6 | 96.4 |
| 5 | Пешавар, Пакистан | 91.8 | 89.6 |
| 6 | Дарбханга, Индия | 90.3 | 175.9 |
| 7 | Асопур, Индия | 90.2 | -- |
| 8 | Нджамена, Чад | 89.7 | 77.6 |
| 9 | Нью-Дели, Индия | 89.1 | -- |
| 10 | Патна, Индия | 88.9 | 78.2 |
| 11 | Газиабад, Индия | 88.6 | 102 |
| 12 | Dharuhera, Индия | 87.8 | 76.9 |
| 13 | Багдад, Ирак | 86.7 | 49.7 |
| 14 | Chapra, Индия | 85.9 | -- |
| 15 | Музаффарнагар, Индия | 85.5 | 73 |
| 16 | Фейсалабад, Пакистан | 84.5 | 94.2 |
| 17 | Большая Нойда, Индия | 83.2 | 87.5 |
| 18 | Бахадургарх, Индия | 82.2 | 139.9 |
| 19 | Фаридабад, Индия | 79.7 | 88.9 |
| 20 | Музаффарпур, Индия | 79.2 | 82.9 |
| 21 | Noida, Индия | 78.7 | 91.4 |
| 22 | Jind, Индия | 77.9 | 84.1 |
| **23** | **Караганда, Казахстан** | **77.8** | **75.5** |
| 24 | Charkhi Dadri, India | 77.4 | 73.9 |
| 25 | Rohtak, India | 74.7 | 86.9 |
| 26 | Стиль, Индийский | 74.3 | 46.6 |
| 27 | Алампур, Индия | 74.1 | 72.5 |
| 28 | Курукшетра, Индия | 73.8 | 68.1 |
| 29 | Бхивани, Индия | 73.5 | 53.8 |
| 30 | Кашгар, Китай | 73.4 | 83.2 |

По представленной таблице следует, что за последние годы в Караганде сохраняется высокий показатель среднегодовой концентрации твердых частиц в воздухе, который превышает в 7-10 раз от нормальных значений. Также согласно этому рейтингк Караганда занимает первое место среди городов Казахстана по загрязнению воздуха [8].

Следует отметить, что в загрязнении атмосферы вносят свой вклад и промышленные отходы, но в среднем 40-75% загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу, приходится на автотранспорт.

С целью решения этой проблемы, многие страны мира внедрили законодательные нормы, регулирующие уровень токсичных выбросов новых автомобилей, на примере стандарта «Евро». Такие стандарты учитывают качественные характеристики топлива, пробег машины, встроенные системы сокращения выбросов вредных веществ и возможность переоборудования двигателя под новые требования [17-18].

Однако требования этого стандарта к экологичности автомобиля приобретают всё более ужесточенный характер. Ужесточение требований в свою очередь проводят к усложнению конструкции двигателя, применению только современных видов топлива, возникновению необходимости в новых запасных частях и поиску квалифицированных специалистов для проведении надлежащего обслуживания и ремонта современных автомобилей. Кроме того чем выше требования стандартов, тем больше необходимо нововедений в автомобилях и тем больше их стоимость, что в целом нецелесообразно для покупателей и потребителей [19].

В связи с необходимостью соответствовать законодательно установленным требованиям перед автокорпорациями была поставлена четкая задача по повышению экологичности их автомобилей. В настоящее время, для соответствия экологическим стандартам и снижения уровня выбросов вредных веществ, в автомобилях применяется система очистки в системе выпуска выхлопных газов (рисунок 1.3).

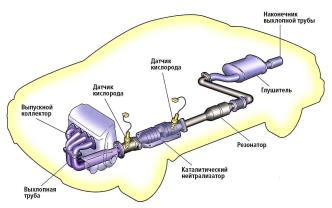


Рисунок 1.3 – Структурная схема системы очистки выхлопных газов автомобилей

Система выпуска состоит из последовательного ряда компонентов, каждый из которых выполняет свою определенную задачу:

- Выпускной коллектор – он выполняет две основные функции: служит для отвода газов из цилиндров двигателя и для их охлаждения. Изготавливается этот элемент из термостойких материалов, так как выхлопные газы обычно имеют высокие температуры, которые колеблются в пределах от 700°C до 1000°C.

- Приемная труба – это специально формированная труба с установленными фланцами, которые служат для соединения с выпускным коллектором или турбонагнетателем.

- Лямбда-зонд предназначен для мониторинга содержания кислорода в газах и устанавливается в систему в одиночном или двойном экземпляре.

- Система очистки, к которой в основном относится каталитический нейтрализатор и сажевый фильтр для дизельного двигателя.

- Каталитический нейтрализатор применяется в двигателях, соответствующих экологическим стандартам Евро-2 и выше, выполняет задачу устранения наиболее вредных компонентов, преобразуя их в менее опасные вещества, такие как водяной пар, углекислый газ и азот.

- Сажевый фильтр предназначен для удаления сажи из выхлопных газов и и используется в дизельном двигателе.

- Пламегаситель может использоваться вместо катализатора или сажевого фильтра в системах выпуска в целях более бюджетной их замены. Он служит для снижения энергии и температуры потока газов, выходящих из выпускного коллектора. Важно отметить, что, в отличие от катализатора, пламегаситель не снижает количество токсичных компонентов в выхлопных газах, а лишь снижает нагрузку на глушители.

- Резонатор, также известный как предварительный глушитель, и основной глушитель предназначены для снижения уровня шума, создаваемого выхлопными газами.

- Трубопроводы используются для соединения различных элементов системы выпуска автомобиля и обеспечения их взаимодействия в единой системе [20].

В бензиновых двигателях принцип работы системы выпуска выхлопных газов следующий:

- выпускные клапаны двигателя открываются, позволяя отработавшим газам, включая остатки несгоревшего топлива, выйти из цилиндров;

- газы из каждого цилиндра сливаются в выпускном коллекторе, где они объединяются в один поток;

- смешанный поток газов направляется через приемную трубу, где проходит через первый лямбда-зонд (кислородный датчик). Этот датчик измеряет уровень кислорода в газах и передает данные в электронный блок управления, который использует эту информацию для коррекции подачи топлива и состава топливовоздушной смеси.

- затем газы проходят через систему очистки, а именно катализатор, где они вступают в химическую реакцию с металлами-окислителями, такими как платина и палладий, а также металлом-восстановителем, например, родием. Для эффективной работы катализатора требуется достаточно высокая рабочая температура, обычно не ниже 300°C.

- после прохождения через катализатор, газы проходят через второй лямбда-зонд, который служит для оценки работоспособности каталитического нейтрализатора.

- затем очищенные отработавшие газы направляются в резонатор, который дополнительно модифицирует поток газов. После резонатора, газы поступают в глушитель, где происходит дальнейшая модификация потока (сужение, расширение, перенаправление), что способствует снижению уровня шума.

- отфильтрованные и уменьшенные по шуму газы выходят в атмосферу через основной глушитель (рисунок 1.4) [21].

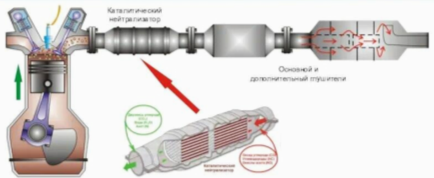


Рисунок 1.4 – Принцип работы системы выпуска выхлопных газов бензинового двигателя

Система выпуска для дизельных двигателей имеет следующий принцип работы:

1. Исходные отработавшие газы выходят из цилиндров и попадают в выпускной коллектор. Температура этих газов варьируется в пределах 500-700 °C.

2. Затем газы направляются в турбокомпрессор, который осуществляет наддув, увеличивая воздушное давление внутри двигателя.

3. После этого газы проходят через лямбда-зонд (кислородный датчик), который контролирует содержание кислорода в газах, и после этой стадии они попадают в систему очистки (катализатор и сажевый фильтр), где удаляются вредные компоненты газов.

4. В завершении, очищенные выхлопные газы проходят через автомобильный глушитель и выходят в атмосферу (рисунок 1.5) [22].



Рисунок 1.5 – Принцип работы системы выпуска выхлопных газов дизельного двигателя

Следует отметить, что эволюция системы выпуска выхлопных газов неразрывно связана с более строгими экологическими стандартами, регулирующими работу автомобилей. Например, начиная с категории Евро-3, установка катализатора и сажевого фильтра стала обязательным требованием для двигателей внутреннего сгорания, и замена этих компонентов на пламегаситель рассматривается как нарушение законодательства.

Каталитический нейтрализатор – это важная часть выхлопной системы и системы очистки автомобиля, предназначенная для снижения выбросов вредных веществ в атмосферу. Он основан на принципе катализа, что позволяет ускорить химические реакции, происходящие в выхлопных газах, и превращать опасные вещества в менее вредные (рисунок 1.6) [23].

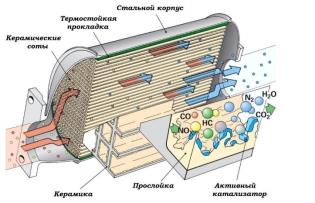


Рисунок 1.6 – Конструкция каталитического нейтрализатора

Каталитический нейтрализатор за счет наличия в своем составе драгоценных материалов эффективно устраняет вредные соединения газов, такие как угарный газ (CO), оксиды азота (NOx), углеводород (CН). Например, угарный газ (СО) и углеводороды (СН) обезвреживаются с помощью платины и палладия, а оксиды азота (NOx) нейтрализуются родием [24]. Тем не менее, использование таких драгоценных металлов в каталитическом нейтрализаторе существенно увеличивает стоимость не только самого устройства, но и, как следствие, автомобиля в целом. Это проявляется в конечной его цене для потребителя, хотя общий вес этих металлов составляет всего 2-3 грамма от общей массы корпуса устройства [25].

Кроме того, каталитические нейтрализаторы имеют ограниченный ресурс, и их необходимо заменять после каждых 100-150 тысяч километров пробега. Это обусловлено тем, что соты катализатора часто забиваются отложениями выхлопных газов. А керамические соты катализатора представляют собой хрупкую конструкцию и подвержены быстрому разрушению, что зависит от интенсивности потока газов, перепада температур и химического состава используемого топлива. Кроме того, при разрушении керамических сот их частицы попадают в двигатель, что приводит к появлению задиров на стенках цилиндров и значительному износу двигательного блока [26].

Помимо этого, каталитические нейтрализаторы проявляют чувствительность к качеству используемого топлива. Использование низкокачественного топлива или добавок, например, антидетонационных присадок, вызывают повреждения катализатора, снижая его эффективность. Также важно отметить, что при низких температурах катализаторы работают менее эффективно, что потенциально приводит к повышенным выбросам вредных веществ в начале движения [27].

В связи с вышеизложенным, следует отметить, что каталитические нейтрализаторы не обладают высокой надежностью, поскольку их срок службы ограничен, а в зависимости от условий эксплуатации они выходят из строя даже до завершения предполагаемого срока их использования. Это приводит к необходимости его замены, что, в свою очередь, влечет за собой значительные финансовые затраты.

Одним из известных путей по снижению токсичности выхлопных газов от автомобилей является переход на использование природного газа в качестве топлива. Двигатели, работающие на природном газе, показывают заметно более низкие выбросы оксидов азота и твердых частиц по сравнению с двигателями, оснащенными каталитическими нейтрализаторами (рисунок 1.7) [28].



Рисунок 1.7 – Автомобиль, работающий на природном газе

Однако стоит отметить, что такие двигатели теряют большие показатели мощности, а их тяговые и скоростные характеристики ухудшаются. Кроме того, обслуживание системы подачи природного газа требует дополнительных затрат [29].

Также известны альтернативные виды транспортных средств, которые удовлетворяют всем требованиям экологической безопасности. Одними из которых являются электромобили и водородные двигатели (рисунок 1.8).

Рисунок 1.8 – Электромобили и водородные двигатели

Основным преимуществом электромобилей и водородных двигателей является отсутствие выбросов вредных газов, таких как углекислый газ (CO2) и азотные оксиды (NOx), что способствует улучшению качества воздуха и снижению их влияния на изменение климата [30].

Хотя электромобили и водородные двигатели представляют собой перспективные альтернативы традиционным автомобильным двигателям, они также имеют свои недостатки, которые не позволяют им заменить традиционный парк автомобилей, работающих на двигателях внутреннего сгорания.

Недостатки электромобилей:

- Ограниченность в дальности поездок: электромобили имеют малую емкость, что ограничивает дальность поездки на одном заряде по сравнению с бензиновыми или дизельными автомобилями. Один заряд позволяет проехать на небольшие расстояния, в лучшем случае лишь 60-100 км. Это может создавать проблемы для долгих поездок;

- Длительное время зарядки: Зарядка электромобиля занимает больше времени, чем заправка топливом, особенно если нет доступа к быстрой зарядке;

- Ограниченная инфраструктура зарядки: В некоторых регионах могут отсутствовать достаточные сети зарядных станций, что может сделать зарядку неудобной;

- Высокая начальная стоимость: Электромобили обычно дороже, чем их аналоги с внутренним сгоранием, хотя этот разрыв постепенно сокращается;

- Ограниченный выбор моделей: Несмотря на рост рынка, пока что доступен ограниченный выбор электромобилей в некоторых классах и сегментах рынка;

- Проблемы с утилизацией батарей: Батареи электромобилей содержат разнообразные материалы, включая литий, никель, кобальт и другие металлы. Эти материалы являются опасными для окружающей среды и требуют специальной переработки. Их извлечение и переработка являются сложными и дорогостоящими процессами. Более того производство батарей также наносит вред окружающей среде из-за добычи и переработки ценных металлов.

- Быстрый износ аккумулятора, особенно в холодные периоды года. В среднем он проработает от 3-х до 5 лет, а затем потребуется их замена, затраты которого равны стоимости всего автомобиля [31].

Недостатки водородных двигателей:

- Инфраструктура водородной заправки: Зарядные станции водорода все еще редки и малодоступны, что делает эксплуатацию таких автомобилей затруднительной;

- Производство и хранение водорода: Это может быть дорого и создавать дополнительные экологические проблемы, если используемые методы не эффективны или не экологически чисты.

- Безопасность: Водород является летучим и легко воспламеняющимся газом, что создает дополнительные требования к безопасности при его хранении, транспортировке и использовании в автомобилях [32].

Итак, электромобили и водородные двигатели обладают множеством преимуществ, но также имеют значительные недостатки, из-за которых по сравнению с автомобилями ДВС они считаются менее подходящими при определенных условиях эксплуатации.

Существуют также различные способы и методы очистки выхлопных газов, применяемые в автотранспорте, с целью снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду. К ним относятся: системы рециркуляции отработанных газов (EGR), фильтры для сажи (DPF), селективная каталитическая очистка (SCR), системы очистки частиц (PM), а также газоочистные системы, основанные на промышленных методах очистки, такие как абсорбция, сорбция, окисление и другие (таблица 1.3) [33].

Таблица 1.3 – Методы и приемы улучшения качества выхлопных газов автомобилей

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Методы и приемы | Описание |
| 1 | Система рециркуляции (EGR) | Система EGR направляет часть отработавших газов заново в цилиндры. Это помогает снижать температуру процесса сгорания и уменьшать показатели оксидов азота (NOx). |
| 2 | Фильтр для сажи (DPF) | Этот тип фильтров используется в дизельных автомобилях для улавливания твердых частиц (сажи), которые образуются в процессе сгорания дизельного топлива. DPF может периодически регенерироваться, чтобы очиститься от накопившихся частиц. |
| 3 | Селективная каталитическая очистка (SCR) | SCR использует добавление мочевины (AdBlue или DEF) в выхлопные газы, чтобы уменьшить содержание NOx, превращая его в азот и воду при помощи катализатора. |
| 4 | Система очистки частиц (PM) | Эта система используется для удаления мелких частиц сажи и других вредных частиц из выхлопных газов. |
| 5 | Газоочистные системы на основе промышленных методов | Газоочистные системы на основе промышленных методов используются для удаления различных загрязнителей из газовых выбросов. В большинстве случаев используются методы, такие как абсорбция, сорбция и окисление, чтобы улавливать и очищать газы. Выбор метода очистки зависит от характеристик выбросов, типа загрязнителей и требований к эффективности очистки. |

Полное описание основных методов, которые могут быть использованы в газоочистных системах представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Основные методы, используемые в газоочистных системах

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Способы и методы | Описание |
| 1 | Абсорбция | Процесс, при котором одно вещество проникает внутрь другого вещества называется абсорбция. Этот метод включает в себя контакт газовых выбросов с жидкостью, называемой абсорбентом, которая поглощает и удерживает загрязнители. Примерами абсорбентов могут быть вода, растворы химических соединений или сорбенты на основе активированного угля. Абсорбция часто используется для удаления SO2 (диоксида серы) и других кислых газов. |
| 2 | Окисление: | Этот метод включает в себя применение окислителей для преобразования загрязнителей в менее вредные соединения или их полное уничтожение. Окисление широко используется для уничтожения органических загрязнителей, таких как VOCs (органические соединения, вызывающие испарение). |
| 3 | Адсорбция | Процесс, при котором атомы, ионы или молекулы одного вещества прилипают к поверхности другого вещества называется адсорбция. Например, когда газ адсорбируется на поверхности твердого тела. Адсорбция происходит на границе раздела двух фаз, образуя адсорбционный слой. |
| 4 | Сорбция | Этот процесс включает в себя как адсорбцию, так и абсорбцию. Таким образом, сорбция охватывает как процессы, связанные с проникновением вещества внутрь другого вещества, так и процессы, связанные с прилипанием к поверхности. Этот метод подразумевает использование специальных материалов, называемых сорбентами, для поглощения и удержания загрязнителей из газовых выбросов. Сорбенты могут быть жидкими или твердыми и выбираются в зависимости от характеристик загрязнителей. Активированный уголь и молекулярные сита - это примеры сорбентов. |
| 5 | Криогенная очистка | Этот метод основан на охлаждении газов до очень низких температур, что позволяет удалить определенные газы и частицы. |

Тем не менее, все вышеупомянутые методы обладают общим недостатком: они приводят к увеличению энергозатрат и расходу топлива двигателя, что влечет за собой повышение операционных расходов и негативно сказывается на общей эффективности автомобилей.

Кроме того, не все из упомянутых методов и способов способны эффективно устранять газовые вредные мелкие частицы. Например, EGR и SCR ориентированы только на снижение выбросов оксидов азота (NOx), в то время как газоочистительные системы специализируются на очистке конкретных видов газовых частиц [34]. Например, если сорбция эффективна для улавливания аэрозолей и летучих органических соединений, то методы окисления работают с газовыми загрязнителями, такими как сероводород или оксиды азота, а абсорбция занимается поглощением газов и их частиц в жидкостях [35,36]. Следовательно, эти методы имеют потенциальные ограничения в области удаления всех видов загрязнителей, включая мельчайшие частицы газа, что подразумевает необходимость поиска новых альтернативных методов очистки.

Новые альтернативные методы очистки не должны приводить к дополнительным экономическим затратам и потерям в тягово-скоростных характеристиках автомобиля. В этой связи возникла идея использования ультразвуковых волн и электроимпульсов для очистки выхлопных газов автомобилей. Ведь эти методы по сравнению с другими методами очистки не только эффективно устраняют крупные частицы газа, но также способны оказывать непосредственное влияние на более мелкие частицы газа диаметром менее 2,5 мкм, которые особенно опасны для здоровья людей и тем самым повышая степень очистки в разы.

Электроимпульсный метод основан на использовании электростатических полей и интенсификации процесса ионизации для привлечения и удержания частиц загрязнителей на поверхности электродов. Электроимпульсный метод особо эффективен для удаления мелких частиц газа и отличается возможностью быстрого достижения стремительных и высоких показателей степени его очистки. Общая степень очистки газа электроимпульсным методом на газоочистительных установках составляет 95% [37].

Очистка выхлопных газов автомобилей ультразвуковыми волнами также оказывают влияние на мелкие частицы газа, вызывают ускорение процесса слипания частиц (коагуляции) и существенно повышают эффективность их осаждения. Особенно эффективно применение ультразвука для частиц размером менее 5 мкм, так как степень освобождения газа от частиц составляет 99-99,5%[38].

Учитывая высокую степень очистки газов ранее представленными методами нами выдвигается гипотеза о возможности разработки новых конструкций, работающих на основе электроимпульсной и ультразвуковой очистки с целью усовершенствования работы системы выпуска выхлопных газов. Разрабатываемые конструкции не только должны повышать качество очистки газа, а также не оказывать существенную нагрузку на сам двигатель, а именно не потреблять большого объема мощности, а их разработка и установка не должны требовать больших денежных затрат.

Однако для проектирования новых конструкций необходимо предварительно рассмотреть физику процесса очистки газа электроимпульсом и ультразвуком. Изучение физики процесса очистки газа электроимпульсной ионизацией и ультразвуковой коагуляцией послужит основой для разработки новых конструкций к системе выпуска автомобилей.

1.2 Физическая сущность процесса очистки газов электрическим разрядом

Газы состоят из электрически нейтральных атомов и молекул, и они сами по себе не являются хорошими проводниками электричества. Структура атома состоит из ядра и вращающихся вокруг его орбиты электронов. Внутри ядра распологаются положительно заряженные протоны и электрически незаряженные нейтроны (рисунок 1.9). Число электронов в оболочке, несущих элементарный отрицательный электрический заряд, равно числу протонов в ядре, электрически они уравновешивают друг друга, образуя нейтральный атом [39].

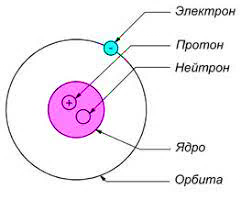


Рисунок 1.9 – Структура атома

Атомы газа при определенных условиях освобождают и приобретают электроны. В таком случае они трансформируются в заряженные или нейтральные частицы. При потере электронов создается избыток положительного электрического заряда и атом получает положительный заряд (+). В случае приобретения электронов атом имеет отрицательный заряд (-) [40].

Атомы или частицы газа, обладающие зарядом в зависимости от вида заряда называются положительным или отрицательным ионом [41].

Электрический заряд образуется в случае внесения в его орбиту (поле) другого электрического заряда. При внесении другого электрического заряда, его атом сталкивается с движущами по орбите электронами и выбивает их оттуда, тем самым образуя положительные и отрицательные ионы. Следовательно чтобы образовать электрический заряд вокруг газа и сделать его проводящим, необходимо создать или внести в него свободные носители заряда. Это можно сделать разными способами, путем подачи высокого напряжения на газ, а также за счет нагревания газа или воздействия на него рентгеновскими и радиоактивными лучами [42].

Практически в каждом случае воздействия на газ заряды внешних атомов сталкиваются с быстрыми электронами газа, происходит отрыв одного или нескольких электронов от орбиты газа. Этот процесс называется ионизацией.

Во время ионизации образуются положительные ионы и свободные электроны. Электроны пересекаясь с нейтральными атоми, создают отрицательные ионы [43].

Эти ионы и электроны возникают за счет энергии ионизации, которая возникает при электрическом разряде. Энергия ионизации соответствует работе атомов. Работа атомов варьируется в зависимости от энергетических и химических свойств газа. Энергия ионизации прямо пропорционально зависит от потенциала ионизации φi. Потенциал ионизации определяется через работу автомов [44]:

*.* (1.1)

Электрический разряд в газах – это явление, связанное с проведением электрического тока через газ, которое в дальнейшем приводит к изменению его параметров, а именно состава, давления, энергетического состояния молекул газа [45].

Разряды в газах возникают как самостоятельно так и несамостоятельно. Если на образование разряда оказывает влияние только внешний ионизатор, а без его воздействия разряд теряет свою силу, то такой разряд называется несамостоятельным. Для изучения вида разряда в газах можно рассмотреть физический процесс, происходящий в стеклянной трубке с двумя металлическими электродами при увеличении разности потенциалов (рисунок 1.10) [46].

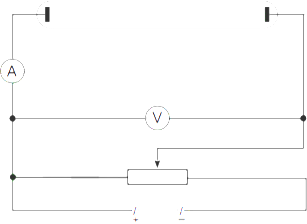


Рисунок 1.10 – Стеклянная трубка с двумя металлическими электродами

Когда разность потенциалов на электродах трубки равна нулю, то устанавливается динамическое равновесие, при котором число вновь образованных пар ионов будет равно числу пар ионов, исчезающих из-за рекомбинации. Рекомбинация – это процесс сближения электрона и положительно заряженного иона, при котором образуется нейтральный атом. Когда между электродами увеличивается разность потенциалов в трубке образуется электрический заряд, в ходе которого возникают положительные и отрицательные ионы. Затем эти ионы продолжают свое движение относительно противозарядных электродов. При этом дальнейшего увеличения электрического тока не происходит и образуется стадия насыщения (рисунок 1.11).

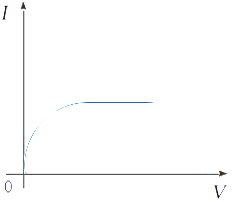


Рисунок 1.11 – Стадия насыщения электрического тока при несамостоятельном разряде

Если ионизатор перестает работать, то разряд также прекращается, так как других источников ионов не будет. По этой причине этот разряд называется несамостоятельным разрядом [47,48].

Если электрический ток в газе протекает или продолжает протекать без внешнего ионизатора, то этот разряд называют самостоятельным или самоподдерживающимся. Такой разряд возникает при очень высоком напряжении на электродах, вызывая ионизацию электронов и ионов [49]. Когда разность потенциалов между электродами достигает потенциала воспламенения (*Vig*), электрический ток начинает резко увеличиваться, показывая наличие дополнительных ионов в газе. При напряжении выше (*Vig*) ток может увеличиваться в сотни и тысячи раз, так как образуется много ионов. Даже при выключении внешнего ионизатора разряд продолжается за счет процессов ионизации в самом разряде. Поэтому этот разряд называют независимым. [50].

Свободные электроны, созданные внешним ионизатором, движутся к электроду, сталкиваясь с ионами и нейтральными атомами. При движении их энергия увеличивается [51]. Когда разность потенциалов между электродами возрастает, напряженность электрического поля увеличивается. Чем выше напряженность и длина пути электрона, тем больше его кинетическая энергия [52].

*,* (1.2)

где e – значение электрона;

E – напряженность электрического поля;

L – длина пути электрона.

Когда кинетическая энергия больше работы нейтрализации (*Wi*), то есть:

. (1.3)

происходит ионизация, генерируя несколько электронов. Эти электроны передают энергию другим атомам, превращая их в заряженные частицы (рисунок 1.12). Этот процесс повторяется, создавая электронную лавину, которая продолжается до достижения электродов. Этот процесс называется ударной ионизацией или ионизацией электронным ударом [53].

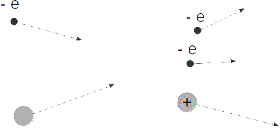


Рисунок 1.12 – Процесс образования ионов и электронов

Электронный удар обеспечивает одноразовую ионизацию, но не является независимым разрядом. Все образовавшиеся электроны движутся к аноду и прекращают участвовать в ионизации по достижении его. Для поддержания разряда новые электроны должны испускаться катодом, что происходит через термоэлектронную и электронную эмиссию [54].

Вторичная эмиссия возникает, когда положительные ионы движутся к катоду и сталкиваются с его поверхностью, высвобождая большое количество электронов. Электроны также высвобождаются при термоэлектронной эмиссии, когда температура газов повышается [55].

В процессе ударной ионизации электроны и атомы переходят на более высокие энергетические уровни и, возвращаясь в нормальное состояние, излучают свет. Это свечение характерно для газов под действием самоподдерживающегося разряда [56].

В газе возникают различные типы разрядов в зависимости от изменения параметров расстояния между электродами и напряжения электрического поля. К таким разрядам относятся: тлеющий, искровой, дуговой и коронный [57].

Самый простой и наиболее изученный тип разряда является тлеющий разряд (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Визуальный вид тлеющиего разряда

Он наблюдается в газах при низких давлениях (около 103 Па и ниже). Чем ниже давление в газе, тем больше среднее расстояние между его атомами. Следовательно, по мере уменьшения давления в газе свободный путь электронов между двумя последовательными столкновениями с атомами увеличивается. Это означает увеличение кинетической энергии электрона перед очередным столкновением и, следовательно, увеличение его ионизирующей способности [58].

Тлеющий разряд образуется в газе при наличии электрического поля, когда напряжение превышает значение, необходимое для ионизации атомов газа, но не достигает критического уровня для полного пробоя.

На образование тлеющего разряда не требуется большая доля энергии по сравнению с более интенсивными формами разряда, такими как дуговой разряд или искровой разряд. В результате этого тлеющий разряд может сохраняться на протяжении длительного времени без полного разрыва газа. Это приводит к стабилизации разряда и возникновению характерного свечения в газе [59].

Тлеющий разряд, несмотря на способность ионизировать газ, не обеспечивает достаточно высокую степень очистки газа от вредных компонентов. Это объясняется тем, что поддержание процесса ионизации в тлеющем разряде требует значительных энергетических затрат, что делает его менее эффективным для полного разложения или окисления этих соединений. Высокие энергозатраты также приводят к повышенным операционным расходам, что ограничивает его широкое применение. Кроме того, использование тлеющего разряда вызывает образование нежелательных побочных продуктов, таких как оксиды азота, которые сами по себе являются загрязнителями [60].

При постепенном увеличении напряжения между двумя электродами, помещенными в газ, возникает отдельный разряд, называемый искровым (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Визуальный вид искрового разряда

В процессе искрового разряда, когда электрическое поле достигает критического уровня, происходит электрический пробой, и плазма (электроны и положительные ионы) становится эффективным проводником тока между электродами, образуя яркую искру. После пробоя сопротивление разрядного промежутка снижается, и через канал протекает кратковременный импульс большого тока, сопровождающийся выделением тепла и света. Высокая температура газа в промежутке вызывает расширение и формирование ударных волн, сопровождающихся звуковыми эффектами, такими как треск [61].

Однако высокая температура газа может способствовать образованию оксидов азота (NOx) и других нежелательных продуктов сгорания. Кроме того искровой разряд как и тлеющий разряд требует значительных энергетических затрат для поддержания своей активности. Это может привести к высоким операционным расходам и ограничивает применение этого метода. Также этот вид разряда неустойчив из-за нестабильности его продолжительности воздействия и перепадов напряжения на электродах. Важно отметить, что при коротком разрядном промежутке искровой разряд приводит к специфическому разрушению электрода [62].

Когда расстояние между электродами уменьшается, а электрическое напряжение между электродами постепенно увеличивается образуется разряд в виде дугового канала (рисунок 1.15) [63].



Рисунок 1.15 – Визуальный вид дугового разряда

Этот разряд поддерживается высокой температурой и свободными электронами, что приводит к интенсивным процессам ионизации и рекомбинации. Движение электронов и ионов в дуговом канале сопровождается выделением тепла, света и звука, делая дуговой разряд видимым и эффектным. При снижении напряжения или прекращении ионизации дуговой канал распадается, завершая дуговой разряд. Дуговые разряды широко используются в технологии сварки, электрических разрядниках, лампах высокого давления и других приборах [64].

Дуговые разряды характеризуются высоким уровнем энергии даже при низком напряжении. Большие количества джоулевого нагрева от тока разряда приводят к значительному повышению температуры и ведут к быстрой эрозии электродов, что является главным недостатком дугового разряда. Кроме того эффективность воздействия дугового разряда на газ по сравнению с другими видами разряда ограничивается невозможностью увеличивания расстояния между электродами, так как дуговой разряд существует в пределах малых расстояний между электродами [65].

Также для поддержания стабильного дугового разряда как и в тлеющем и искровым разрядах требуется значительное количество энергии. Это может привести к высоким операционным расходам, особенно при длительной работе, что делает его менее экономически эффективным. А высокотемпературная плазма, создаваемая дуговым разрядом, также способствует образованию нежелательных продуктов, таких как оксиды азота (NOx) [66].

Коронный разряд занимает промежуточное место между искровым и тлеющим разрядами. Этот разряд возникает в результате неоднородности электрического поля, которая происходит, когда на поверхности одного из электродов образуется свечение с высокой кривизной (рисунок 1.16) [67].



Рисунок 1.16 – Визуальный вид коронного разряда

Процесс образования коронного разряда происходит следующим образом.

Под действием высокого напряжения происходит ионизация газа, где атомы теряют или получают электроны, образуя положительные и отрицательные ионы. При дальнейшем увеличении напряжения возникает светящийся слой ионизованного газа вокруг острия электрода, известный как корона. Когда напряжение достигает определенного уровня, коронный слой может переходить в коронный разряд, сопровождаемый вспышками света и характерными световыми эффектами, а также звуком [68].

Коронный разряд в зависимости от того на каком электроде он возникает называется отрицательным и положительным. При отрицательном коронном разряде отрицательно заряженные ионы притягиваются к положительно заряженным объектам, а положительно заряженные ионы отталкиваются. При положительном коронном разряде положительные ионы притягиваются к негативно заряженным объектам, а отрицательные ионы — к положительно заряженным объектам.

Оба типа коронного разряда сопровождаются характерным звуком, а его прерывистый характер связан с периодическими импульсами лавин, частота которых зависит от состава газа и напряжения [69].

Коронный разряд по сравнению с искровым разрядом более устойчив к скачкам напряжения, так как часть энергии, вырабатываемой в процессе ионизации плавно рассеивается во время движения электронов от катодного электрода, в связи с этим показатели напряжения резко не падают. Кроме того вследствие воздействия коронного разряда окружающий газ становится более проводящим, что приводит к увеличению виртуального диаметра электрода и повышению эффективности процесса ионизации [70].

По сравнению с другими видами разрядов коронный разряд нашел широкое применение при конструировании газоразрядных устройств, в частности электрофильтров, предназначенных для устранения промышленных газов от твердых и жидких примесей. Применение коронного разряда обусловлено тем, что этот вид разряда плавно и положительно реагирует к повышению показателей напряжения от внешнего источника, что позволяет обеспечить устойчивый процесс работы газочистительных устройств. Помимо этого коронный разряд имеет широкое воздействие на газ, тем самым повышает ее проводимость. [71].

На сегодняшний день достигнут предел эффективности газоочистки постоянным током, поэтому для дополнительного повышения степени чистоты газа и снижения энергопотребления применяется импульсное питание. Это включает постоянное напряжение с добавлением коротких импульсов, превышающих пробойное напряжение. Однако для образования эффективного пробоя важно подбирать частоту импульса так, чтобы избежать искрового разряда, который может нарушить работу газоочистителей [72].

Таким образом эффективность влияния коронного разряда на газ не вызывает никаких сомнений, а его воздействие на пару с импульсным питанием является наиболее эффективным методом для очистки газа в газообразных устройствах. В результате этого возникает предположение о потенциальной применимости коронного разряда в системе очистки отработавших газов внутреннего сгорания. Предлагается разработать электроимпульсный глушитель для выхлопной системы двигателя, задачей которого будет обеспечение очистки выбросов автомобиля.

1.3 Физическая сущность процесса очистки газов ультразвуком

При исследовании свойств ультразвука было обнаружено, что он способствует агломерации (увеличению размеров) мелких частиц, находящихся в газе. Такой процесс агломерации называется «коагуляцией» [73].

Коагуляция в газе подразумевает объединение мельчайших частиц газового состояния в более крупные агрегаты. Процесс укрепнения частиц происходит в результате их столкновений, что приводит к дальнейшему увеличению их размера [74].

Коагуляция в газе может проявляться явно и скрыто. Внутри газовых частиц происходит естественный процесс коагуляции, который проявляется без внешних воздействий. Такой тип коагуляции называется скрытым, поскольку изменения происходят внутри газовой среды и не всегда легко заметны внешнему наблюдателю. При явной когуляции наблюдается заметная агломерация частиц и последующая их седиментация. Скрытая коагуляция может лежать в основе этого процесса, приводя к формированию видимых изменений (рисунок 1.17) [75].

Рисунок 1.17 – Классификация видов коагуляции

Основной причиной возникновения скрытой коагуляции является тепловая коагуляция или броуновское движение частиц. Явная коагуляция, с другой стороны, может быть обусловлена изменением кинематических характеристик газа, таких как появление градиента скорости в потоке или воздействие кинематических сил. Кроме того, коагуляция может быть искусственно вызвана внешними факторами, такими как ультразвуковое, электрическое и пульсационное воздействие.

Тепловая коагуляция может происходить как быстро, так и медленно. Медленная коагуляция возможна только в том случае, если частицы газа успешно сталкиваются друг с другом. Быстрая коагуляция происходит более стабильно и зачастую между частицами, которые уже находятся в процессе тепловой коагуляции [76].

М. Смолуховский первым создал теорию кинетики Броуновской коагуляции, которая объясняет, что частицы, двигающиеся по закону Броуна, сталкиваются, и некоторые из этих столкновений приводят к их объединению, уменьшая общее количество частиц. Он также утверждал, что скорость коагуляции, зависит от нескольких факторов, включая коэффицент диффузии *D,* описывающий интенсивность броуновского движения, концентрацию дисперсной фазы *n*, и критическое расстояние, необходимое для соединения частиц *р*. Это критическое расстояние может быть больше диаметра самих частиц *r*. По его теории, частица соединяется с другой, если ее центр находится на расстоянии *р* от центра первой частицы, формируя сферу поглощения. Однако на больших расстояниях Смолуховский полагал, что молекулярные силы притяжения и их влияние на броуновское движение и процесс сближения можно игнорировать [77,78].

По теории Смолуховского, во время быстрой коагуляции частицы сначала объединяются в пары в результате столкновений. Затем эти парные частицы могут сталкиваться с одиночными частицами, формируя более сложные структуры. Возможны и столкновения между более сложными структурами частиц, однако такие события происходят с невероятно малой вероятностью, поэтому их можно пренебречь в расчетах. Поэтому важно учитывать только столкновения между отдельными частицами. Это приводит к тому, что количество столкновений и численная концентрация частиц изменяются в геометрической прогрессии. Другими словами, скорость коагуляции должна быть пропорциональна квадрату численной концентрации дисперсной фазы, что определяет вероятность столкновения частиц до достижения критического расстояния.

, (1.4)

где - константа коагуляции, выраженная в метрах в секунду, отражает вероятность приближения частиц друг к другу. [79].

Теория Смолуховского подтверждается исследованиями Уайтлоу-Грея, дающие правильное объяснение природе процесса коагуляции и обеспечивающие надежные методы счета частиц в аэрозолях. Согласно исследованиям команды Уайтлоу-Грея коагуляция очень многих аэрозолей подчиняется простому закону, который позволяет определить число изменения частиц газа с течением времени. Это уравнение было получено по аналогичному уравнению Резерфорда определяющий скорость рекомбинации ионов газа:

*,* (1.5)

где – число частиц в 1 см3 в некоторый момент времени *t*;

*n0* – число частиц в момент образования дыма;

*К –* постоянная.

Обозначив и , получим:

, (1.6)

где представляет собой объем, приходящийся в среднем на одну аэрозольную частицу.

Из уравнения (4) легко видеть, что скорость убывания счетной концентрации из-за коагуляции зависит лишь от квадрата концентрации частиц и констант коагуляции, а именно:

. (1.7)

Таким образом через уравнение (1.7) определяется скорость убывания счетной концентрации частиц газа. Чем выше счетная концентрация частиц газа, тем выше скорость протекания процесса коагуляции. Однако с прохождением некоторого времени скорость процесса коагуляции заметно уменьшается в связи с убыванием числа частиц после их агрегации и последующей седиментации [80].

В теории Смолуховского сфера радиусом S, является частью системы частиц. Она находится в любой точке пространства и значительно больше общего объема всех частиц. Предполагается, что каждая частица имеет возможность достичь поверхности этой сферы и присоединиться к ней. Сфера способна поглощать *4πDSn* частиц в единицу времени если в единице объема содержится *n* частиц. Тогда скорость исчезновения частиц представляется следующим образом.

, (1.8)

где *D* – коэффициент диффузии частиц.

Поскольку все частицы задействованы в диффузии, одиночный коэффициент диффузии заменяется на сумму коэффициентов диффузии двух взаимодействующих частиц. Радиус также был заменен на среднее значение радиусов сфер частиц. Когда значение радиуса равно значению удвоенного радиуса частиц, то они будут слипаться только при непосредственном контакте. Однако, когда значение радиуса превышает значение удвоенного радиуса частиц, то они будут слипаться, когда центр одной частицы входит внутрь сферы влияния другой. Подставляя эти значения в уравнение, получаем следующее:

, (1.9)

Процесс диффузии является результатом броуновского движения отдельных частиц. Как было показано Эйнштейном, величина D paвнa:

, (1.10)

где R - газовая постоянная;

Т- абсолютная температура;

N – число Авогадро;

– вязкость среды;

r – радиус частиц.

Подставляя значения , и , в уравнение (1.9), имеем:

, (1.11)

где r1 и r2 – радиусы двух сталкивающихся частиц.

Если теперь предположить, что отношение радиусов сферы действия (*S1+S2)* к радиусам частиц (*r1+ r2)* для всех частиц одинаково, то мы получим:

, (1.12)

и, если все частицы одного размера (...), то:

, (1.13)

Так как R, T, s, и N постоянны, то после интегрирования получаем:

, (1.14)

где -число частиц в единице объема в момент времени ,a *n*0 – та же величина при t=0.

Обозначая 1/n через и 1/ *n*0 через , в итоге уравнение (1.14) представлен в следующем виде:

. (1.15)

Согласно полученному уравнению следует, что объем частицы и время коагуляции связаны линейно. Отсутствие размера частицы в уравнении означает, что частицы разного размера коагулируют с одинаковой скоростью [81].

Градиентная коагуляция основывается на различиях в концентрации частиц, температуре, давлении и других параметрах, создающих градиенты. В газовой среде это происходит, когда скорость потока газа изменяется, например, возле стенки трубы, что приводит к столкновению и слиянию частиц. Частицы ближе к стенке двигаются медленнее, чем те, что находятся дальше, увеличивая вероятность их столкновения и коагуляции [82]. Однако для частиц размером менее 1 мкм эффект градиентной коагуляции является ничтожным, и его влияние можно пренебречь при расчетах [83].

Кинематическая коагуляция происходит, когда частицы разного размера двигаются с разной скоростью под воздействием внешних сил, таких как гравитация или центробежные силы. Под влиянием этих сил частицы сталкиваются и объединяются, увеличивая свой размер.

Примером кинематической коагуляции является процесс осаждения частиц на каплях под действием силы тяжести, который также называют гравитационной коагуляцией. Например, капли воды, двигаясь вниз, захватывают и увлекают с собой частицы пыли [84].

На практике кинематическую коагуляцию используют в устройствах для очистки газов, таких как форсуночные скрубберы. В этих устройствах форсунки распыляют воду в верхней части, и капли воды двигаются вниз. Загрязненный поток газов поступает снизу. Когда капли воды и частицы газа встречаются, они взаимодействуют, и частицы пыли улавливаются и выносятся из устройства. Таким образом кинематическая коагуляция учитывает взаимодействие частиц газа с капельками воды [85].

Электрическая коагуляция в газовой среде представляет собой процесс объединения частиц под воздействием электрических полей. Этот метод используется для удаления твердых частиц из газовых потоков. Принцип работы основан на воздействии электрических сил на частицы, изменяя их электрический заряд и способствуя их соединению.

Процесс электрической коагуляции включает ионизацию газа под воздействием электрического поля, зарядку вредных частиц через столкновения с ионами, и последующую коагуляцию, при которой заряженные частицы объединяются в более крупные структуры [86].

Электрическая коагуляция часто применяется в системах очистки газов, где требуется удаление мельчайших частиц. Примерами могут быть электрофильтры или электростатические отделители, где газ проходит через электрическое поле, и частицы подвергаются коагуляции под воздействием электрических сил [87].

Скорость коагуляции частиц газа повышается при использовании метода турбулизации. При турбулизации создается вихревое движение, которое способствует соприкосновению и интенсивному объединению частиц. Турбулентная коагуляция проявляется в системах для перемешивания, такие как мешалки или турбулизаторы [88].

Этот механизм коагуляции частиц в газах включает в себя следующие аспекты: турбулентность газа, столкновения и слияние частиц газа, формирование агломератов, изменение размеров частиц.

Турбулентная коагуляция значительно изменяет пути движения мелких частиц, когда они проходят мимо крупных. Это означает, что каждое столкновение на основе прямолинейных траекторий, приводит к слиянию при турбулентном потоке. Однако для частиц размером менее 10-5 см турбулентная коагуляция не столь существенна, поскольку между ними происходит броуновская диффузия. Иными словами, ускорение и появление турбулентной коагуляции в основном характерны для более крупных частиц [89,90].

Как было описано ранее мощные ультразвуковые колебания вызывают ускорение процесса коагуляции и существенно повышают эффективность их осаждения. Особенно эффективно применение ультразвука для частиц размером менее 5 мкм, так как степень освобождения газа от частиц составляет 99-99,5%. Такое воздействие на газ упругих колебаний ультразвуковой частоты называется акустической коагуляцией. При акустической коагуляции колебания ультразвуковых волн образуется интенсивная вибрация частиц, что способствует резкому увеличению числа столкновений и приводит к самой коагуляции. Акустическую обработку газов проводят при уровне звука не менее 145 – 150 дБ и частоте колебаний 2 – 50 кГц. Акустическая обработка газов эффективна до 550 °С [91,92].

Акустическая коагуляция приводит к двум видам эффектов. Первый эффект обусловлен передачей импульса одной частицы газа к другой. Второй эффект возникает в результате колебательных движений частиц. Первый вид эффекта приводит к гидродинамической коагуляции, описанной В. Кёнингом. Второй вид эффекта создает ортокинетическую коагуляцию, которая была исследована О. Брандтом, Х. Фройндом и Е. Хидеманом. Если при гидродинамической коагуляции частица движется синхронно с газовой фазой, то при ортокинетической коагуляции частица скользит относительно газовой фазы и имеет меньшую амплитуду колебаний, чем амплитуада газового потока. Этот эффект скольжения обусловлен инерцией частицы [93,94].

На акустические колебания частицы в газовой среде влиют три фактора: взаимные колебания частиц и газа, динамические воздействия между частицами и давление акустической радиации [95]. Несмотря на повышения эффективности процесса коагуляции за счет воздействия на частицы газа ультразвуком, механизм процесса ультразвуковой коагуляции частиц газа весьма сложен и недостаточно изучен. До последнего времени существовали три основных теорий возникновения акустической коагуляции: пондеромоторный, ортокинетический и гидродинамический, радиационный (рисунок 1.18) [96].

Рисунок 1.18 – Теории возникновения акустической (ультразвуковой) коагуляции

Пондемоторная теория коагуляции основывается на пондемоторных силах, которые действуют на частицы в газовой среде. Эти силы возникают под воздействием ультразвукового поля. Пондемоторные силы обусловлены изменением давления ультразвуковой волны, создаваемой звуковыми колебаниями.

Основные положения пондемоторной теории коагуляции включают воздействие ультразвуковых волн, которые создают изменения давления в газовой среде и порождают пондемоторные силы. Эти силы действуют на частицы в газе, вызывая их коагуляцию и увеличение размера, а также могут вызывать акустические течения и вихреобразование [97].

Ортокинетическая теория коагуляции описывает процесс слияния частиц в газовой среде под воздействием их ортокинетического движения. Ортокинетика в данном контексте означает движение частиц в направлении их главных осей. Эта теория учитывает, как ортокинетическое движение частиц может способствовать их сближению и коагуляции. Важными факторами в ортокинетической теории являются размер и форма частиц, их ориентация и скорость [98].

Гидродинамическая теория коагуляции фокусируется на влиянии гидродинамических сил на слияние частиц. Эти силы включают в себя вязкостные, давление-модулирующие и конвективные эффекты (перенос тепла, массы или других свойств среды в результате её макроскопического движения) в потоке газа. Гидродинамическая коагуляция основывается на представлении о том, как перемещение среды и различные параметры потока влияют на столкновение и объединение частиц. Скорость потока, градиент скорости и другие гидродинамические характеристики играют ключевую роль в этой теории [99].

Ортокинетическая теория объясняет, как колеблющиеся частицы коагулируются в результате взаимодействия друг с другом, в то время как гидродинамическая теория основывается на процессе коагуляции, возникающий под влиянием гидродинамических сил притяжения. Когда частицы имеют разные размеры, то между ними образуется ортокинетическая коагуляция, а когда частицы имеют приблизительно одинаковые размеры, то между ними возникает гидродинамическая коагуляция. Поэтому при рассмотрении процесса коагуляции между частицами газа необходимо учитывать и ортокинетическую и гидродинамическую коагуляцию( [100].

В газовой среде коагуляция частиц может происходить из-за изменений радиального давления, вызванных различными физическими механизмами, такими как градиент скорости, турбулентность, акустические волны (ультразвук) и гидродинамические эффекты [101]. Периодическая сила, вызванная радиационным давлением ультразвука, заставляет частицы двигаться к областям с низким давлением, но высокой амплитудой колебаний. Радиционное давление особенно эффективно при стоячей волне, а не при бегущей волне, и проявляется при высоких частотах [102].

Несмотря на существования трех основных теорий возникновения ультразвуковой коагуляции, общепризнанной теории указанного процесса пока не существует и полный физический механизм ультразвуковой коагуляции остается до сего времени невыясненным, так как каждый из этих теорий берет за основу только один эффект приводящий к коагуляции. Однако эффективность воздействия ультразвука на газ не вызывает никаких сомнений и подтверждается следующими фактами:

– ультразвук способствует увеличению размеров частиц;

– ультразвук адаптивен к средам, с показателями высокой температуры и давления;

– ультразвуковое оборудование, в частности излучатели отличаются компактными размерами, что удобен в установке к системе очистки и не утежеляет его конструкцию;

– ультразвуковое оборудование не требует больших затратов мощности;

– ультразвук способуствует улучшению эффективности очистки газа за счет ускорения процесса коагуляции;

– очистка газа ультразвуком эффективна и на коротких временных промежутках [103].

Таким образом, применение высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний для предварительной обработки потока газов позволит значительно повысить эффективность очистки, а в ряде случаев обеспечит возможность практически полного его обезвреживания. В связи с этим была также выдвинута гипотеза о возможности примения ультразвука (как и электроимпульса) для очистки отработавших газов ДВС. С целью подтверждения этой гипотезы предлагается разработать ультразвуковой глушитель к системе очистки и выпуска двигателя, который будет осуществлять очистку отработавших газов автомобилей. Однако прежде чем приступить к разработке конструкции электроимпульсного и ультразвукового глушителей необходимо изучить существующие конструкции электроимпульсных и ультразвуковых устройств для очистки газов.

1.4 Анализ существующих конструкций работающих на основе электроимпульсного и ультразвукового метода очистки

Среди устройств, использующих электроимпульсные и электрические методы для очистки газа, наиболее известны электрофильтры, которые работают за счет образования электростатических зарядов. Эти устройства создают коронный разряд для улавливания и осаждения твердых частиц. Электрофильтры широко используются в промышленности, энергетике и системах вентиляции и очистки воздуха [104].

Основные компоненты электрофильтра включают в себя коллектор (с электродами), диэлектрический слой, систему подачи газового потока и систему сбора и удаления отфильтрованных частиц. Также используются управляющие системы, такие мониторинг для контроля процесса очистки (рисунок 1.19).

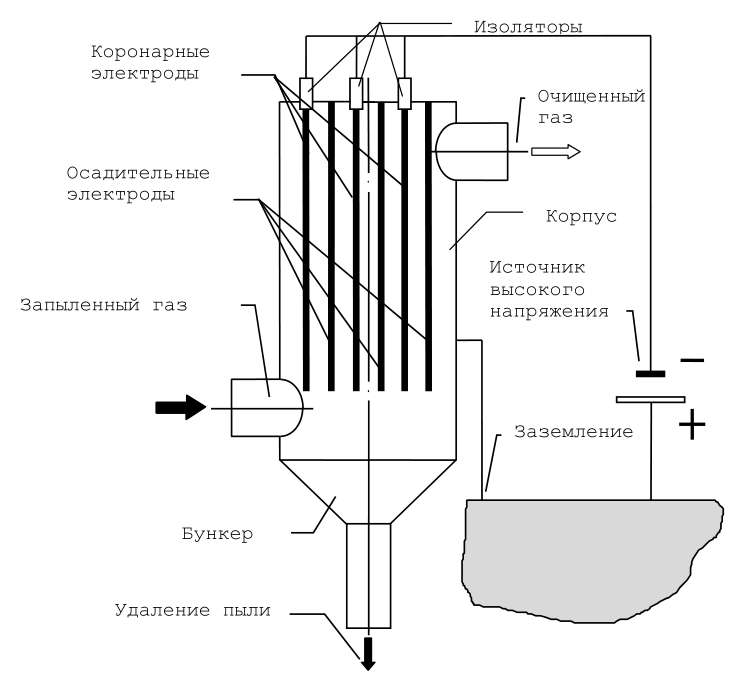


Рисунок 1.19 – Конструктивная схема электрофильтра

Электрофильтры способны улавливать частицы различного размера, включая мелкие аэрозоли, что делает их эффективными для очистки газа с частицами разных размеров. Однако эффективность очистки зависит от многих факторов, включая тип частиц, скорость газового потока и конструкцию электрофильтра [105].

Принцип работы электрофильтра заключается в следующем. Газ проходит через коллектор, где расположены электроды: коронарные (отрицательные) и осадительные (положительные). Отрицательные электроды имеют форму проволочной сетки, а положительные представляют собой пластины, которые чередуются вертикально [106].

Частицы газа ионизируются высоковольтным разрядным электродом под действием коронного разряда, получают отрицательный заряд и притягиваются к положительным пластинам коллектора. Отрицательная клемма высоковольтного источника постоянного тока подключена к отрицательным электродам, а положительная – к положительным пластинам [107]. Определенное расстояние между электродами поддерживает высокий градиент напряжения, создавая коронный разряд вокруг стержней или проволочной сетки отрицательных электродов [108].

Вся система электрофильтра заключена в металлический контейнер с впускным отверстием для дымовых газов и выпускным отверстием для отфильтрованных газов [109].

Существуют различные типы электрофильтров среди которых самыми распространенными являются пластинчатый, сухой, мокрый и трубчатый электрофильтр (таблица 1.5) [110].

Таблица 1.5 – Типы электрофильтров и их принцип работы

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Виды электрофильтра | Описание  электрофильтра | Принцип работы |
| Пластинчатый  электрофильтр | Это самый простой тип электрофильтра, который состоит из рядов тонких вертикальных проводов и | Газовый поток проходит горизонтально через вертикальные пластины, а затем через большую стопку пластин. Для того чтобы |

Продолжение таблицы 1.5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Виды электрофильтра | Описание  электрофильтра | Принцип работы |
| Пластинчатый  электрофильтр | стопки вертикально расположенных больших плоских металлических пластин, которые размещаются на расстоянии от 1 см до 18 см друг от друга. | ионизировать частицы, между проволокой и пластиной. Затем эти ионизированные частицы направляются к заземленным пластинам. По мере того, как частицы собираются на сборной пластине, они удаляются из газового потока. |
| Сухой электрофильтр | Он в основном состоит из электродов, через которые проходят ионизированные частицы, и бункера, через который извлекаются собранные частицы. | Газовый поток проходит через коронирующие электроды. Образуется коронный разряд и происходит ионизация газа, в следствии чего образуются заряженные частицы. После этого частицы газа собираются на осадительном электроде, они удаляются из газового потока, попадая в бункер. |
| Мокрый электрофильтр | Он состоит из коллекторов, которые непрерывно распыляются водой, производя сбор ионизированных частиц из осадка. | Принцип работы аналогичен как у сухового электрофильтра. Однако мокрые элеутрофильтры более эффективны, чем сухие, так как осуществляют непрерывную или прерывистую промывку жидкостью коллекторов, устраняя появление частиц из-за постукивания, которым подвержены сухие электрофильтры. |
| Трубчатый электрофильтр | Электрофильтр представляет собой одноступенчатый блок, состоящий из трубок с высоковольтными электродами, которые расположены параллельно друг другу таким образом, что они могли двигаться вокруг своей оси. Расположение трубок может быть круглым, квадратным или шестиугольным, с возможностью течением газов вверх или вниз. | Газовый поток проходит по трубкам с электродами. На электродах образуется коронный разряд, который приводит к ионизации газа. В результате ионизации вредные частицы газа оседают на параллельных электродах, а очищенный поток газа выпускается наружу. Такие электрофильтры применяются в случаях, когда необходимо удалить липкие частицы. |

Электрофильтры имеют следующие преимущества:

- Высокая долговечность;

- Они используются для сбора как сухих, так и влажных примесей;

- Они имеет низкие эксплуатационные расходы;

- Эффективность улавливания высока даже для мелких частиц;

- Они работают с большими объемами газа и тяжелыми пылевыми нагрузками при низком давлении.

Однако электрофильтры имеют следующие недостатки и ограничения:

- Высокие затраты на установку: Электрофильтры имеют сложную инженерную конструкцию, в связи с этим на их установку требуются значительные денежные затраты.

- Большой расход электроэнергии: Электрофильтры требуют непрерывного питания электроэнергией для своей работы, что приводит к значительным затратам на электроэнергию и увеличению операционных расходов.

- Требует обслуживания: Электрофильтры требуют регулярного обслуживания, включая замену или очистку фильтров и электродов, чтобы поддерживать их эффективность.

- Эффективность зависит от типа загрязнителя: Некоторые электрофильтры могут быть менее эффективными в улавливании определенных типов загрязнителей, таких как масла, дым или химические вещества.

- Размер и вес: Промышленные электрофильтры могут быть крупными и тяжелыми, что может потребовать большого пространства и усилий для установки и обслуживания [111,112].

Хотя электрофильтры успешно очищают газы, но их использование в системах выхлопа автомобилей невозможно. Ведь установка электрофильтров обусловлена значительными расходами из-за своей сложной инженерной конструкции и необходимостью больших пространственных требований в своем размещении. Кроме того электрофильтры неспособны работать на разных условиях и режимах изменения потока газа. Следовательно разработка специальных электрофильтров для системы выпуска автомобилей не представляется возможным.

Среди всех устройств, работающих на основе ультразвукового метода очистки газа наиболее известны различные виды циклонов, аустических систем и пылеулавливателей.

Таблица 1.6 – Устройства, работающих на основе ультразвукового метода очистки газа

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Устройства, работающие на основе ультразвукового метода очистки | Описание  устройств | Принцип работы |
| Циклоны | Конструкция системы состоит из акустической колонки, циклона и фильтрующего элемента | Запыленный газ подается в акустическую колонку, где под воздействием звукового поля происходит отделение пылевых частиц. Затем очищенный газ поступает на вторичную очистку в циклон, где за счет центробежной силы происходит их закручивание и оседание остатков частиц. Мелкие частицы, которые не были уловлены в циклоне, в последствии задерживаются на фильтрующем элементе [113]. |

Продолжение таблицы 1.6

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Устройства, работающие на основе ультразвукового метода очистки | Описание  устройств | Принцип работы |
| Акустическая система газопылеочистки воздушных выбросов | Система включает горизонтальный цилиндрический корпус с акустическими форсунками, водяным туманом и каплеуловителем. | Загрязненный газ поступает в корпус, где встречается с распыленным водовоздушным факелом. В зоне контакта водяной туман абсорбирует газообразные вредные вещества, а каплеуловитель отделяет капли растворов из воздушного потока. Капли стекают и удаляются через слив в систему нейтрализации сточных вод [114]. |
| Вихревой пылеуловитель с акустическим распылителем жидкости | Аппарат состоит из цилиндрического корпуса с бункером, осевого ввода с завихрителем, эжекционной насадки и вторичного ввода. В корпусе установлены акустические форсунки для подачи воды и сжатого воздуха. | Загрязненный газовый поток приводится в вихревое движение, позволяя отделить частицы пыли. Эжекционная насадка создает разрежение, улучшая отделение мелких частиц. Аппарат обеспечивает эффективное пылеулавливание, особенно для легких твердых частиц [115]. |

Акустические циклоны, акустические системы газопылевой очистки и вихревые пылеулавливатели с акустическим распылителем жидкости являются достаточно эффективными технологиями, используемые для удаления пыли и загрязнителей из газовых потоков. Однако у них есть некоторые недостатки:

- Энергопотребление: Акустические системы обычно требуют значительного количества энергии для работы, особенно если нужно создать высокочастотные звуковые волны. Это приводит к высоким затратам мощности.

- Требуется тщательная настройка при изменении условий эксплуатации.

- Расход ресурсов: Применение акустических систем требует использования определенных ресурсов, таких как вода (в случае вихревых пылеулавливателей с акустическим распылителем жидкости) или химических добавок (в некоторых случаях).

- Шум и вибрации: Работа акустических систем может сопровождаться высокими уровнями шума и вибраций, что может потребовать дополнительных мер для обеспечения безопасности.

- Обслуживание и замена компонентов: Системы ттребуют регулярного обслуживания и иногда замены компонентов, что повлечет за собой дополнительные затраты и простои в эксплуатации [116].

Учитывая представленные недостатки рассмотренных акустических систем, их внедрение в работу системы выпуска выхлопных газов представляется невозможным.

Ввиду невозможности недрения электрофильтров и ультразвуковых оборудований в работу системы выпуска ДВС также был проведен патентный обзор существующих конструкций, работающих на основе электрической (на основе коронного разряда и электроимпульсов) и ультразвуковой очистки, которые могли бы быть применены в системе выпуска автомобилей. Результаты проведенного обзора представлены в приложении А [117-126].

Согласно проведенному обзору следует, что для проведения очистки газа с использованием электроимпульса и ультразвука требуется дополнительная разработка специальной камеры сгорания в системы очистки и выпуска газов. Это нововведение не только усложняет конструкцию системы выпуска, но и делает ее более громоздкой, что может привести к ухудшению работы систем двигателя. Кроме того, такие конструкции потребляют дополнительную энергию от автомобиля, что увеличивает нагрузку на двигатель и приводит к повышенному расходу топлива.

Согласно результатам проведенного литературного обзора по существующим конструкциям и устройствам очистки газа ультразвуком и электроимпульсом (коронным разрядом) мы предлагаем разработать альтернативные виды глушителей, которые будут работать на представленных методах очистки. Разработка альтернативных конструкций глушителя включает в себя внедрение ультразвукового излучателя и размещение электродов внутри глушителя автомобиля. Использование глушителя, оснащенного ультразвуковым и электроимпульсным оборудованием, имеет потенциал снизить уровень вредных выбросов газов, при этом не оказывая значительной нагрузки на двигатель. Это связано с тем, что работа ультразвукового и электриомпульсного оборудований не требует большого энергопотребления, их разработка и установка не сложны и не требуют значительных денежных затрат.

В настоящее время существует ряд исследований, посвященных очистке выхлопных газов с использованием электроимпульсных и ультразвуковых методов. В этом направлении научной группой кафедры «Транспортная техника и логистические системы» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова были разработаны различные экспериментальные стенды.

Член научной группы кафедры Пак И.А. разработал экспериментальный стенд для очистки и утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов с использованием ультразвуковой технологии. Этот стенд включает себя светопрозрачный корпус (1) с впускным (8) и выпускным патрубками (4), ультразвуковой излучатель (2), генератор (3) и отражатель ультразвуковых волн (7) (рисунок 1.20) [127].

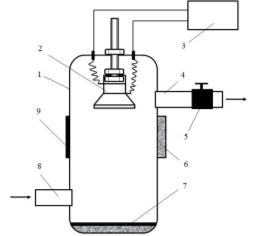


Рисунок 1.20 – Экспериментальный стенд ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов

Результаты экспериментальных исследований на этом стенде показали, что под воздействием ультразвука происходит интенсификация процессов увеличения и осаждения частиц в выхлопных газах, что в свою очередь положительно влияет на их прозрачность. Были также проведены серии опытов, с учетом воздействия и не воздействия ультразвука на поток газа, для изучения его способности пропускать и поглощать свет в зависимости от времени осаждения твердых частиц.

Б.К. Сарсембеков, входящий также в научную группу кафедры разработал несколько экспериментальных стендов ультразвукового глушителя с целью подтверждения гипотезы об эффективности очистки выхлопных газов бензиновых двигателей ультразвуком. Корпусы этих стендов оснащены ультразвуковым оборудованием, состоящий из ультразвукового генератора и излучателя. Также в стендах есть специальное место для сбора сажи (рисунки 1.21 – 1.23).

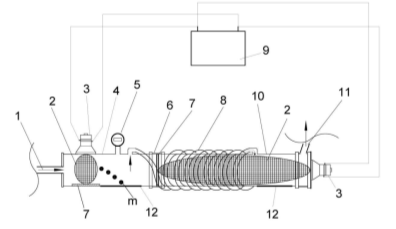


Рисунок 1.21 – Двухсекционный экспериментальный стенд ультразвукового автомобильного глушителя №1

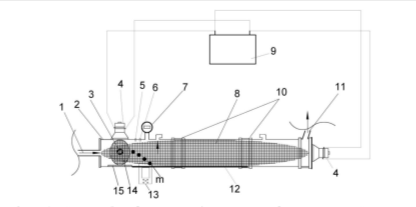


Рисунок 1.22 – Схема экспериментального стенда полипропиленового ультразвукового автомобильного глушителя №2

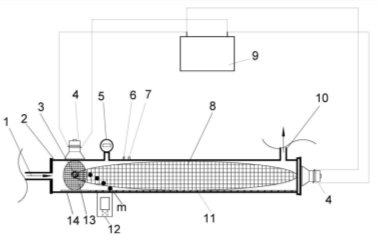


Рисунок 1.23 – Схема экспериментального стенда металлического ультразвукового автомобильного глушителя №3

Целью создания различных стендов для ультразвуковых автомобильных глушителей было найти оптимальное конструктивное решение и изучить влияние материала корпуса на процесс очистки выхлопных газов. Эксперименты подтвердили эффективность ультразвуковых глушителей в очистке газов. Исследования показали, что масса коагулированных частиц (сажи) под воздействием ультразвука увеличивается более чем в два раза. Также наблюдается повышение содержания кислорода, снижение уровня углекислого газа и значительное уменьшение помутнения выхлопного газа – более чем на 21% [128].

В ходе своей диссертационной работы К.С. Синельников, являющийся членом научной группы, разработал ультразвуковой стенд с целью уменьшения токсичности выбросов дизельных автомобилей. В корпус стенда интегрированы два ультразвуковых излучателей, ориентированных продольно и поперечно (рисунок 1.24).

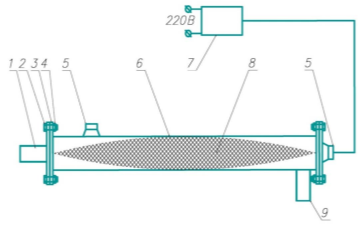
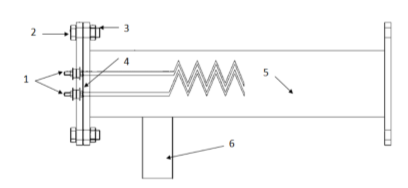


Рисунок 1.24 – Ультразвуковой стенд для снижения токсичности выхлопных газов дизельного автомобиля

Экспериментальные исследования на стенде проводились для оценки эффективности ультразвукового воздействия на степень помутнения газов, изменение концентрации и соотношения различных компонентов газа в выбросах, а также для определения массы коагулированных частиц в выхлопных газах дизельного двигателя.

Результаты экспериментов показали, что после воздействия на газ ультразвуком показатели состава газа изменились, а степень помутнения уменьшилась более чем на 20%. Угарный газ был окислен и преобразован в углекислый газ [129].

Крючков Е.Ю. входящий в состав научной группы, разработал экспериментальный стенд электроимпульсного глушителя в ходе выполнения своей диссертационной работы (рисунок1.25).



1 – электроимпульсные электроды; 2 – болт; 3 – гайка; 4 – фланец; 5 – стальная труба; 6 – входной патрубок

Рисунок 1.25 – Схема экспериментального стенда электроимпульсного глушителя

Испытания на экспериментальном стенде электроимпульсного глушителя проводились для получения показателей состава и дымности газа до и после воздействия электроимпульсом. Результаты экспериментов показали, что после воздействия электроимпульсом повышается доля кислорода и снижается уровень дымности. [130].

Разработанные экспериментальные стенды и проведенные исследования на них доказывают эффективность предлагаемых методов и целесообразность разработки технологий для улучшения работы системы очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания автомобилей.

1.5 Цель и задачи исследования

На основе вышеизложенного следует, что автомобили с ДВС приводят к серьезному загрязнению воздуха, несмотря на стандарты «Евро» и применение каталитических нейтрализаторов. Альтернативы, такие как природный газ, электромобили и водородные двигатели, имеют свои недостатки, которые не дают им возможность для широкого применения в мировом автопарке. А существующие методы очистки выхлопных газов часто увеличивают расход энергии и топлива и не способны очищать газ от более вредных и мелких частиц.

Идея разработки ультразвукового и электроимпульсного глушителей представляет собой перспективное решение для более эффективной и экономичной очистки выхлопных газов, требующее дальнейших исследований и разработок Перспективность этого направления доказывают исследования, проведенные Паком И.А., Сарсембековым Б.К., Синельниковым К.А., Крючковым Е.Ю. В этих исследованиях была доказана применимость и эффективность предлагаемых ультразвуковых и электроимпульсных глушителей. Однако до сих пор остался нерешенным вопрос оптимизации работы этих глушителей и определении основных параметров их конструкции и режима работы. Таким образом, необходимость установления оптимального режима работы ультразвукового и электроимпульсного глушителей для системы очистки ДВС автомобиля, а также разработка предложений по их конструкциям и применению определяет актуальность исследования..

Целью исследования является получение экспериментальных и теоретических зависимостей, позволяющих разработать методику расчета конструкции и определить оптимальный режим работы системы очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания.

Для достижения цели требуется выполнить следующие задачи:

1. проанализировать конструкции автомобильных глушителей и систем очистки выхлопных газов;

2. рассмотреть физическую сущность электроимпульсного и ультразвукового воздействия на выхлопной газ;

3. обосновать критерий оптимальности работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

4. методами теория подобия установить параметры, описывающие режим и конструкцию электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

5. разработать стенды для проведения экспериментов, описать методику и порядок исследования;

6. по результатам совместного анализа теоретических зависимостей и экспериментальных данных установить оптимальные диапозоны изменения регулируемых параметров работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

7. установить области применения электроимпульсного и ультразвуового глушителей;

8. разработать техническое задание, методику расчета и рекомендации по проектированию, применению и регулировке режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей.

Структура диссертационной работы представлена следующим образом:

Изучить процессы очистки выхлопных газов электроимпульсного и ультразвукового глушителей, выявив основные параметры.

Установить критерий оптимальности и критерии подобия работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей

Разработать экспериментальные стенды для проведения экспериментальных исследований с целью определения показателей дымности газов в зависимости от

параметров расстояния между электродами (Δ) и частоты электроимпульса (*f*) в электроимпульсном глушителе

параметра расстояния частоты ультразвука (*f*) в ультразвуковом глушителе

С учетом изменения угловой скрости вращения коленчатого вала ω (числа оборотов коленчатого вала) двигателя)

Обработка экспериментальных результатов и установления оптимальных значений параметров

Рисунок 1.26 – Структура выполнения дисертационной работы

Выводы по первому разделу:

- проведен анализ существующих конструкций систем очистки, альтернативных решений и методов очистки, направленных на снижение токсичности выхлопных газов автомобилей;

- рассмотрена физическая сущность воздействия электричества на газ. Рассмотрены процесс ионизации газа и виды разрядов, возникающих в межэлектродном пространстве. Обоснована эффективность применения коронного разряда в процессе очистки газа;

- проанализирована физическая сущность воздействия ультразвука на газ. Рассмотрены основные виды и теории коагуляции. Представлены аргументы в пользу эффективности применения ультразвука для повышения интвенсивности процесса коагуляции;

- проведен анализ существующих конструкций работающих на основе электроимпульсного и ультразвукового метода очистки. Описана работа электрофильтра и устройств ультразвуковой очистки. Проведен патентный обзор конструктивных решений применения электроимпульсного и ультразвукового методов для очистки газа. На основе проведенного анализа выявлены недостатки существуюших конструкций;

- выдвинута гипотеза о возможности разработки новых конструкций глушителей, работающих на основе электроимпульсной и ультразвуковой методов очистки с целью усовершенствования работы системы выпуска выхлопных газов;

- обоснованы цель и задачи исследования.

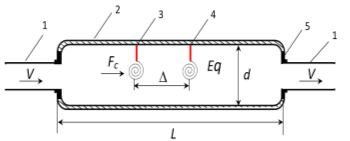
2 Теоретическое и экспериментальное исследования процесса очистки выхлопных газов в электроимпульсном глушителе

2.1 Анализ исследования работы электроимпульсного глушителя

Электроимпульсный глушитель - это устройство, которое предназначено для системы очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания автомобиля и осуществляет сбор мелких частиц, их отделение и удаление из газового потока.

Принцип работы такого глушителя заключается в электроимпульсном воздействии на поток газа, посредством образования коронного разряда в межэлектродном пространстве. Коронный разряд, в свою очередь, приводит к процессу ионизации газового потока и образованию электрически заряженных частиц. Заряженные частицы взаимодействуя с вредными частицами газа приводит к процессу электрокоагулции с последующим их осаждением.

На рисунке 2.1. дана принципиальная схема работы электроимпульсного глушителя.



1 – труба выпускной системы; 2 – корпус глушителя; 3 и 4 – электроды;

5 – соединение с уплотнением.

Рисунок 2.1 – Принципиальная схема работы электроимпульсного глушителя

Согласно этой схеме газовый поток, протекая по трубе выпускной системы поступает во внутрь корпуса глушителя, где расположены два электрода. При поступлении потока газа на межэлектродном промежутке возникает коронный разряд, что приводит к процессу ионизации с последующей электрокоагуляцией и иницируется процесс его очистки. В результате очищенные от вредных частиц газы выходят наружу через выпускную трубу глушителя.

Для определения оптимального режима работы электроимпульсного глушителя требуется описать ключевые параметры, которые воияют на эффективность коронного разряда. Согласно проведенному обзору литературных источников, нами было выявлено, что на коронный разряд в процессе очистки газа влияют следующие параметры: напряжение внешнего источника, расстояние между электродами, давление газа, геометрические формы электродов, температура газа и частота импульса.

Прилагаемое напряжение от внешнего источника имеет прямо пропорциональное влияние на воздействие коронного разряда в процессе электроимпульсной очистки газа в глушителе. Если приложенное напряжение высокое, то и интенсивность коронного разряда будет высокое. Напротив, при низких значениях напряжения (меньше критического разрушительного напряжения) его будет недостаточно, чтобы вызвать пробой в газе, следовательно, коронный разряд не произойдет [131].

Расстояние между электродами оказывает существенное влияние на процесс очистки газа, а именно на качество возникновения коронного разряда. К примеру, уменьшение расстояния способствует легче возбуждению коронного разряда за счет интенсивности электрического поля и повышения вероятности ионизации воздуха. Это приводит к увеличению энергии разряда делая его стабильным и мощным [132]. Также следует отметить, что слишком близкое расстояние между электродами имеет за собой опасность перехода коронного разряда в искровой, особенно при высоком напряжении [133].

Форма и конфигурация электродов также оказывает существенное влияние на характеристики коронного разряда. К примеру, острые края и концы электродов способствуют более легкому возникновению коронного разряда, создавая более интенсивные электрические поля [134].

Изменение давление газа также существенно влияет на возникновение и характеристики коронного разряда. Например, уменьшение давления газа обычно способствует легче возбуждению коронного разряда. При низком давлении электрическое поле становится менее плотным, следовательно потребуется меньше энергии для инициирования разряда. Это связано с увеличением свободного пробега заряженных частиц. Также при пониженном давлении уменьшается тепловая кондукция, что повышает температуру в местах разряда [135].

Температура газа повышает интенсивность коронного разряда и продолжительность процесса ионизации. Чем интенсивнее идет процесс ионизации, тем больше образуются свободные электроны и ионы, которые способствуют к повышению токопроводимой способоности газа и образованию более мощного разряда [136].

Частота электроимпульса оказывает влияние на способность инициирования коронного разряда. Обычно коронный разряд возникает быстрее при высоких частотах. На низких частотах молекулам газа требуется больше времени для образования процесса ионизации, что усложняет начало разряда. Частота импульсов также влияет на интенсивность коронного разряда. Высокая частота способствует созданию более мощного и стабильного разряда, поскольку энергия, подаваемая в систему за единицу времени, увеличивается [137].

При высокой электроимпульсной обработке газа возможно образование обе фазы разряда. Вслед за коронной стадией разряда, процесс разряда может перейти в искровой, который продолжится до окончания импульса напряжения. Однако образование искрового разряда нежелательно при работе электроимпульсного глушителя, так как этот тип разряда не эффективен в процессе очистки газа [138]. Следовательно работа электроимпульсного глушителя будет считаться неоптимальной. Поэтому во время работы электроимпульсного глушителя крайне важно поддерживать коронный разряд в стабильном состоянии. Для того, чтобы коронный разряд был постоянным необходимо определить какие из рассмотренных параметров являются регулируемыми.

Под регулируемым параметром понимают переменную или характеристику системы, которая может быть изменена или настроена в процессе её работы для достижения определенных целей или оптимального режима функционирования. Это может быть любая величина, которая влияет на процесс или результат работы системы и может быть контролируема оператором или автоматически регулируема в соответствии с заданными параметрами или условиями во время работы. Поэтому все рассмотренные параметры были условно распределены на регулируемые и нерегулируемые параметры (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Регулируемые и нерегулируемые параметры, влияющие на работу электроимпульсного глушителя

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Регулируемые параметры | | Нерегулируемые параметры | |
| Название параметра | Влияние на  коронный разряд | Название параметра | Влияние на  коронный разряд |
| Расстояние между электродами  (1/Δ) ~ cr | Уменьшение расстояния между электродами улучшает формирование коронного разряда, так как повышается интенсивность электрического поля и вероятность ионизации воздуха, что облегчает возбуждение разряда | Напряжение электри-ческого поля  (U) ~ cr | Если приложенное напряжение высокое, то и интенсивность коронного разряда будет высокое |
| Частота электро-импульса  (*f*) ~ cr | Частота электроимпульса оказывает влияние на формирование коронного разряда: при повышенных частотах разряд возникает быстрее из-за уменьшения времени взаимодействия газовых молекул между импульсами, в отличие от низких частот. | Давление  газа  (1/P) ~ cr | Уменьшение давления газа обычно способствует легче возбуждению коронного разряда |
| Форма и конфигура-ция электродов | Закрученные края и острые концы электродов способствует более легкому возникновению коронного разряда, создавая более интенсивные электрические поля | Температура газа  (T) ~ cr | Высокая температура газа повышает интенсивность коронного разряда и продолжительность процесса ионизации |

Регулируемые параметры коронного разряда могут быть изменены или настроены так, чтобы для достигался оптимальный режим работы электроимпульсного глушителя.

Как было отмечано ранее, геометрические характеристики электродов оказывают непосредственное влияние на эффективность и продолжительность коронного разряда. Электроды для устойчивого воздействия коронного разряда должны обладать следующими характеристиками: точная форма, механическая прочность и жесткость.

Обычно электроды оснащаются двумя видами (рисунок 2.2):

- ленточно-игольчатые коронирующие электроды;

- ленточно-зубчатые (пилообразнын) электроды.

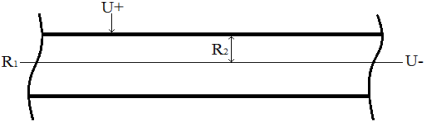
Изучение физических процессов при очистке газов в элекгрофшп.трах с импульсным питанием продолжается. Уточняются области применения знакопеременного питания электрофильтров. Разрабатываются методы расчета эффективности электрофильтров при использовании знакопеременного электропитания, при котором время напряжения каждой полярности выбирают равным времени возникновения обратного коронного разряда [13].


*а, б, в* – ленточно-игольчатые электроды;

*г*- ленточно зубчатые (пилообразные) электроды.

Рисунок 2.2 – Элементы электродов

Использование ленточно-игольчатых электродов позволяет получить коронный разряд с заданной неравномерностью при пониженных значениях токов.А ленточно-зубчатыеэлектроды обеспечивают равномерное распределение тока короны по всему полю, за счет наличия фиксированных точек ионизации [139]. Однако в настоящее время нет универсального электрода, подходящего для всех газочистных оборудований. Следовательно считатется целесообразным индивидуальный подбор электродов в зависимости от условий работы и конструктивных характеристик газоочистного устройства. Кроме того представленные электроды широко применимы в электрофильтрах, за счет их соответстующих конструктивно-геометрических характеристик (большая длина протяженности), позволяющих разместить их во внутреннем копусе электрофильтра (рисунок 2.3).



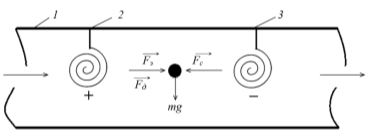
- радиус коронирующего электрода ;

- радиус осадительного электрода ; +U, –U - приложенные напряжения положительного и отрицательного знаков.

Рисунок 2.3 – Принципиальная схема электрофильтра-разрез

Но в глушителе из-за его размеров и изгибов газопровода невозможна такая конструкция электродов. Следует отметить, что коронный разряд происходит в местах, где напряженность  вокруг проводника превышает  [диэлектрическую силу](https://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_strength) газа. Этот вид разряда больше всего образуется в сильно изогнутых областях на электродах. Такая кривизна электродов вызывает высокий [градиент потенциала](https://en.wikipedia.org/wiki/Potential_gradient) в межэлектродном промежутке, что приводит к разрушению структуры газа.  В связи с этим целесообразно применение в разрабатываемом электроимпульсном глушителе спиралевидные электроды, которые отличаются своей изогнотостью в двух плоскостях и наличием трех витков. Такая конструкция электродов увеличивает площадь воздействия коронного разряда на газовый поток и повышает проводимость газов.

Процесс очистки отработавших газов также зависит от того, как силы воздействуют на частицы газа, проходящих по внутренней поверхности электроимпульсного глушителя. Согласно математической модели движения частицы газа, представленной в диссертационной работе Крючкова Е.Ю помимо эффективной (электродвижущей) силы *Fэ* на частицу массой *m* воздействуют следующие силы: сила давления со стороны двигателя *Fд* исила динамического трения (Стокса) *Fс* (рисунок 2.4) [130, c 85].



где 1 – корпус глушителя; 2 и 3 – положительный и отрицательный электроды

Рисунок 2.4 – Движение частицы газа в конструкции электроимпульсного глушителя

Сила давления прямо пропорционально зависит от размеров частицы. Средний размер частицы газа имеет малые значения. Поэтому числовое значение силы давления соответствует четвертому порядку малости, в связи с этим этой силой можно пренебречь.

Противоположно к электродвижущей силе *Fэ* на газовую частицу действует сила динамического трения *F*c. Электроды, расположенные вдоль центральной оси глушителя, благодаря своей конструкции увеличивают силу трения частиц. Сила трения определяется законом Стокса:

*,* (2.1)

где – средний радиус частицы газа

– динамическая вязкость газа;

– скорость движения частицы

Закон Стокса справедлив для частиц очень малого размера, когда на сопротивление движению частицы оказывает влияние только вязкость среды.

В этой математической моделе была получена следующая система уравнений, описывающая движение частицы газа во взаимосвязи с параметрами режима работы предлагаемой конструкции электроимпульсного глушителя:

. (2.2)

Первое уравнение системы (2.2) описывает движение частицы, второе взаимосзвязь скорости движения частицы с емкостью камер сгорания и угловой скоростью вращения коленчатого вала, третье связь напряженности с межэлектродным расстоянием.

Задачей анализа системы уравнений являлось установление взаимосвязей между параметрами двигателя и системы очистки электроимпульсом. В ходе решения системы уравнения в итоге были получены следующие уравнения, позволяющие определить скорость частицы газа и оптимальное расстояние между электродами, при котором не возникает переход коронного разярда в искровой:

, (2.3)

. (2.4)

Полученные зависимости (2.3), (2.4) определяет необходимую и обязательную взаимосвязь между параметрами режима работы системы «двигатель – электроимпульсный глушитель» [140].

Также согласно полученным зависимостям следует, что в процессе работы ДВС происходит изменение угловой скорости вращения коленчатого вала *ω*, при этом изменяется скорость движения *ϑ* и объем выхлопного газа, попадаемого в корпус электроимпульсного глушителя *Q*, что влечет за собой изменение режима его работы и может привести к затуханию коронного разряда или переходу его в искровой. Однако при регулировании значением параметра расстояния между электродами Δ вполне возможно сохранить стабильность образовавшего коронного разряда и предотвратить его переход в искровой разряд. Следовательно одним из регулируемых параметров в достижении необходимого режима работы электроимпульсного глушителя является параметр расстояния между электродами Δ. Однако изменение этой величины влечет за собой необходимость изменения напряжения *Eq*. В связи с особенностями электросистемы транспортного средства и его ограниченности подачи напряжения эту величину легче менять изменением частоты импульса электроразряда между электродами *f*. Ведь частота электроимпульса влияет на качество и интенсивность воздействия коронного разряда. Следовательно, для того чтобы определить оптимальный режим работы электроимпульсного глушителя необходимо совместно регулировать параметрами *f* и Δ.

Для достижения результативной очистки выхлопных газов в электроимпульсном глушителе имеет смысл регулирования параметрами *f* (частота электрического импульса) и Δ (расстояние между электродами) с учетом изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя (*ω*). Это позволит добиться эффективной работы глушителя, что будет отражаться в более качественной очистке выхлопных газов. В связи с этим необходимо следующее:

1. обоснование критерия оптимальности работы электроимпульсного глушителя;

2. определение основных параметров режима и конструкции электроимпульсного глушителя во взаимосвязи с критерием оптимальности;

3. установление взаимосвязи между параметрами: *ω*, *f* и Δ.

2.2 Установление критерия оптимальности работы электроимпульсного глушителя

Критерий оптимальности – это способ оценки качества объекта через его количественные показатели. Этот критерий позволяет оценить эффективность рассматриваемого объекта или процесса. В задачу оптимизации входит установление целевой функции. Целевая функция оптимизируемого объекта или процесса формируется на основе выбранного критерия оптимальности и представляет собой зависимость этого критерия от параметров, влияющих на его значение [141].

В задачах оптимизации выбранный критерий оптимальности должен соответствовать определенным критериям:

1. Количественная и однозначная выраженность: критерий должен быть измеряем численно и иметь однозначное значение, чтобы его можно было использовать для сравнения с различными вариантами решения;

2. Единственность: критерий оптимальности должен быть единственным, то есть он должен быть основным показателем, по которому оценивается эффективность работы объекта оптимизации;

3. Физический смысл и полнота описания: критерий должен иметь определенный физический смысл и обеспечивать полное описание процесса или характеристики объекта оптимизации;

4. Простота и математическая определенность: критерий должен быть простым в выражении и математически определенным, а также иметь достаточную точность для оценки эффективности решения задачи оптимизации [142].

В зависимости от типа и уровня задач оптимизации основные критерии оптимальности имеют следующую классификацию (рисунок 2.5).

Критерии оптимальности

Эксплуатационные

Технологические

Экономические

Технико-экономические

Прочие

-минимальная стоимость;

-максимальная прибыль;

-рентабельность,

- минимальные затраты.

-точность изготовления оборудования и его физико-химические свойства;

- качество поверхности оборудования (шероховатость, остаточные напряжения

и др.)

-износостойкость;

-усталостная прочность;

-жесткость

и др.

-наибольшая производи-тельность;

-наивысокий коэффициент полезного действия оборудования.

-эстетические;

-эргономи-ческие;

-экологические и т.д.

Рисунок 2.5 – Виды критериев оптимальности

Экономические и технико-экономические критерии оптимальности получили широкое распространение при решении задач оптимизации из-за их важности в процессе разработки объектов и решения более конкретных задач. Технические условия объекта должны обеспечивать его эффективную работу, что измеряется показателями производительности и КПД. С другой стороны, уменьшение трудозатрат и сокращение издержек на производство также играют ключевую роль. Среди технико-экономических критериев наиболее важным является достижение максимальной производительности, в то время как в группе экономических критериев основное внимание уделяется снижению затрат [143].

В нашем случаи для разработки электроимпульсного глушителя и оценки его эффективной работы в качестве экономических и технико-экономических критериев рассматриваются следующие критерии оптимальности:

- максимальная производительность работы электроимпульсного глушителя;

- минимальные затраты на изготовление электроимпульсного глушителя.

При разработке электроимпульсных глушителей достигается эффективность работы не только глушителя но и всей системы выпуска выхлопных газов двигателя. Ведь существующая конструкция глушителя и других составляющих выхлопной системы припятсвуют к увеличению продуктивности их работы. К примеру, стандартные глушители производят достаточно высокое противодавление к потоку газов из камеры сгорания двигателя. Противодавление возникает по причине неровных поверхностей стенок, препятствий и закруглений в трубах глушителя. В итоге обратное давление, вызванное конструкцией глушителя, негативно влияет на эффективность работы двигателя, что приводит к снижению его выходной мощности [144].

Помимо глушителя, например, в каталитическом нейтрализаторе по мере оплавления и забивания их сотовой структуры уменьшается проходное сечение каналов, что приводит к затрудненному прохождения отработавших газов и в последствии к снижению собственной производительности, а также к уменьшению мощности двигателя и к росту расхода топлива. Оплавление сотовой структуры происходит при повышениии допустимого порога температуры выхлопных газов, а их забивание происходит за счет образования продуктов неполного сгорания топлива и масла [145].

Электроимпульсный глушитель обеспечивает эффективное и быстрое удаление выхлопных газов, что оптимизирует процесс выхлопа. Следовательно показатель «максимальная производительность работы электроимпульсного глушителя» вполне мог быть взят за критерий оптимальности.

Кроме того изготовление электроимпульсного глушителя не требуют больших денежных затрат, в отличие от катализаторов, которые реализуются на рынке в высоком диапазоне цен. Основной причиной высокой стоимости катадизаторов является дороговизна материалов для их изготовления. Катализатор – один из самых дорогих узлов автомобиля, благодаря драгоценному составу материалов из которого его изготавливают. Ценными материалами по выпуску катализаторов являются платина*,* палладий и родий*.* Стоимость перечисленных драгоценных металлов в совокупности по цене в десятки раз превышает стоимость золота [146].

Следовательно на сборку электроимпульсного глушителя требуется намного меньше затрат. В связи с этим выбор в качестве критерия оптимальности «минимальные затраты на изготовление электроимпульсного глушителя» также считается вполне целесообразным.

В некоторых оптимизационных задачах, когда объект является частью более крупной системы, не всегда целесообразно оценивать его эффективность исключительно через прямые экономические или технико-экономические показатели. Эти показатели могут быть недостаточными для полного охвата всех аспектов работы объекта и его вклада в общую систему [147]. В нашем случае глушитель является составной частью систем очистки и выпуска выхлопных газов. В то время как система выпуска является вспомогательной системой двигателя, обеспечивающая правильную и полную его работу. В связи с этим ранее отмеченные варианты критериев не в полной мере оценивают работу электроимпульсного глушителя, а именно не учитывают результативность очистки газов электроимпульсом. Они в большей степени указывают на повышение эффективности работы самого двигателя и оптимального состояния автомобиля в целом, нежели описывают эффективную работу электроимпульсного глушителя. Ведь основная цель создания электроимпульсного глушителя заключалось в повышении эффективности работы системы очистки отработавших газов, так как существующая система не вполной мере справляется с этой задачей. Следовательно в качестве критерия оптимальности работы электроимпульсного глушителя необходимо выбрать тот параметр, который напрямую описывает качество очистки газов. В связи с этим, в качестве критерия оптимальности работы электроимпульсного глушителя было выбрано соотношение показателей дымности после (и до ( воздействия на отработавший газ электроимпульсом.

. (2.5)

Дымность – это показатель, который указывает на уровень загазованности или зарязнения выхлопных газов вредными частицами [148]. А отношение дымностей после воздействия на газ электроимпульсом к дымности до воздействия на газ электроимпульсом дает возможность определить в какой степени отработавший газ был очищен от вредных примесей. Ведь соотношение показателей дымности характеризуется степенью светопоглощения частиц газа. Чем ниже показатели светопоглощения, после воздействия на газ электроимпульсом, тем меньше частиц остаются в потоке газа. Это доказывает эффективность воздействия электроимпульса в нейтрализации потока газа от вредных частиц [149].

В основном показатели дымности измеряются двумя методами:

1. Метод фильтрации основан на прохождении выхлопных газов через белую фильтровальную бумагу. Но его использование неудобно из-за длительности и сложности проведения измерений.

2. Оптический метод измерения основан на оценке того, насколько в видемом спектре отработавшие газы поглощают свет определенной длины волны. Этот метод соответствует международным стандартам. (Правила ЕЭК ООН № 24, ISO-3173/ ISO 7 11614) [150].

При использовании оптического метода измеряется интенсивность поглощения светового потока в специальной измерительной камере. Результаты, полученные путем сравнения интенсивности света до и после его прохождения через эту камеру, позволяют определить степень задымленности выхлопных газов [151]. При оценке эффективности работы электроимпульсного глушителя, это соотношение будет представлено как отношение освещенности света после и до воздействия электроимпульса на газ в глушителе.

Также следует ометить, что дымность является одним из технических параметров, характеризующих качество работы двигателя. В автоцентрах при техническом обслуживании и техническом осмотре автомобиля дымность проверяется специальными приборами.

Таким образом выбор в качестве критерия соотношение показателей дымностей позволяет не только характеризовать работу электроимпульсного глушителя но и косвенно оценивать эффективность и экономичность работы всей системы выпуска (очистки) выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания.

Критерий оптимальности работы электроимпульсного глушителя, а именно соотношение дымности газа, меняются в зависимости от регулируемых параметров, таких как расстояние между электродами Δ и частота электроимпульсов *f*. Эти изменения в свою очередь зависят от угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя ω. Следовательно схема оптимизации работы электроимпульсного глушителя будет иметь следующий вид (рисунок 2.6):

Рисунок 2.6 – Схема оптимизации работы электроимпульсного глушителя:

при *f/Δ=const*; *D2/D1→min*

Таким образом, соотношение дымности является оптимальным критерием для оценки степени задымленности и токсичности отработавших газов в электроимпульсном глушителе. А регулировирование параметрами, таких как расстояние между электродами Δ и частота электроимпульса *f*, позволяет достичь оптимального значения этого показателя, что свидетельствует о высокой эффективности работы глушителя. Однако для обеспечения эффективной работы электроимпульсного глушителя во взаимосвязи с критерием оптимальности необходимо установить все параметры, влияющие на режим и конструкцию электроимпульсного глушителя.

2.3 Установление параметров характеризующих режим работы электроимпульсного глушителя

Режим работы электроимпульсного глушителя – это совокупность его процессов перехода из одного состояния в другое, определяющихся большим количеством параметров. Параметры рассматриваемого глушителя должны характеризовать основные его физические, геометрические или иные свойства, которые оказывают влияние на оптимальное состояние его работы.

Кроме того параметры являются неотъемлемыми элементами экспериментальных исследований, без которых невозможно составить план эксперимента, провести опыты и выполнить обработку получаемых результатов. С целью правильной постановки и обработки экспериментов, необходимо вникать в сущность процесса работы электроимпульсного глушителя, давать общий качественный анализ его параметрам. Для этого необходимо определить входные, внутренние и выходные параметры, описывающие работу этого глушителя.

Входные параметры отражают внешние требования к глушителю, значения или характер изменения этих параметров предварительно известны с той или иной точностью. К входным параметрам относятся геометрические характеристики глушителя и параметры задающие условия изменения показателей его работы со стороны двигателя.

Внутренние параметры характеризуют процесс работы самого глушителя. Они необходимы для характеристики свойств работы глушителя. К таким параметрам можно отнести переменные, имеющие влияние на процесс очистки отработавших газов электроимпульсом внутри глушителя.

Часть входных параметров и внутренних параметров, описывающие работу электроимпульсного глушителя могут быть преобразованы в комплексные параметры и использованы в качестве выходных данных для экспериментальных исследований. Такие параметры называются выходными параметрами.

Работа электроимпульсного глушителя зависит от значительного числа входных, внутренних и выходных параметров (переменных), таких как число оборотов двигателя, частота электроимпульса, расстояние между электродами, диаметр корпуса электроимпульсного глушителя, динамическая вязкость газа, скорость частицы газа и многих других. Однако работу электроимпульсного глушителя невозможно описать детеминированной функцией ввиду влиянием на него большого количества факторов. В этом случае целесообразным будет применение метода теории подобия и анализ размерностей.

Метод теории подобия и анализа размерностей – теоретический метод исследования, который позволяет рассматривать большое количество параметров в комплексном виде, посредством составления ключевых критериев подобия. Этот метод применим к изучению сложных процессов, которые невозможно описать детерминированной фнкцией. Уникальность этого метода заключается в разработке методики расчета критериев подобия, которые могут быть справедливы для оценки работы подобных глушителей разных размеров и мощностей [152].

Метод теории подобия и анализа размерностей основан на трех положениях:

1. Для правильного составления методики расчета критериев подобия требуется определить все параметры которые влияют или могли бы влиять на работу электроимпульсного глушителя. Затем согласно первой теореме подобия для установления пропорциональности между параметрами, составляется уравнение их зависимости [153].

2. Согласно второй теореме подобия решение составленного уравнения позволит получить критерии подобия. Для того, чтобы проверить корректность составленного уравнения необходимо каждый его параметр преобразовать в однородный вид относительно размерностей, как того требует Теорема Букингема. Преобразование параметров осуществляется за счет размерностей физических величин, которые их описывают [154].

3. По теореме определяется число критериев подобия, которые будут получены при решении составленного уравнения. Если при решении уравнения не будут получены критерии подобия, число которых совпадает с теоремой , то уравнение было составлено неверно. По теореме число критериев подобия определяется через разницу между общим числом параметров, образующее уравнение зависимости и общим числом размерностей физических величин, используемые для преобразования параметров в однородный вид относительно размерностей. [155].

На основе проведенного литературного обзора были установлены все параметры, влияющие на работу электроимпульсного глушителя: число оборотов коленчатого вала двигателя (, частота электроимпульса (, расстояние между электродами (), напряжение электрического поля (), показатели дымности газа до (*D*1) и после (*D*2) воздействия на него электроимпульсом, сила электрического тока (), плотность газа (), диаметр корпуса электроимпульсного глушителя , динамическая вязкость газа (), скорость частицы газа (), сила света (*J*v).

Согласно ранее представленным положениям между параметрами было составлено следующее уравнение зависимости:

, (2.6)

Затем решение уравнения приобрело следующий вид:

.(2.7)

Далее параметры уравнения были преобразованы в однородный вид через размерности пяти физических величин: длины , массы , времени , силы света *J* и силы электрического тока *I* (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Формулы размерностей физических величин параметров

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Название  параметров | Обозначение | Единица измерения | Формула размерности |
| 1 | Число оборотов  коленчатого вала двигателя |  | об/мин | *T-1* |
| 2 | Частота электроимпульса |  | c-1 | *T-1* |
| 3 | Плотность газа |  | кг/м3 | *ML-3* |
| 4 | Диаметр корпуса  электроимпульсного глушителя |  | м | *L* |
| 5 | Динамическая вязкость газа |  | Пас | *ML-1 T-1* |
| 6 | Скорость частицы газа |  | м/с | *ML-1* |
| 7 | Объем глушителя |  | м3 | *L-3* |
| 8 | Объем (емкость) камеры сгорания двигателя |  | м3 | *L-3* |
| 9 | Сила света | *J*v | кд | *J* |
| 10 | Напряжение электрического поля |  | В | L2MT−3I−1 |
| 11 | Сила электрического тока |  | А | I |
| 12 | Расстояние между электродами |  | м | L |
| 13 | Дымность газа до воздействия электроимпульсом | *D*1 | лк | *JL-2* |
| 14 | Дымность газа после воздействия электроимпульсом | *D*2 | лк | *JL-2* |

Согласно полученному уравнению (2.7) число параметров равно , а число основных размерностей физических величин равно . В соответствии с-теоремой, число критериев подобия будет равно: . Следовательно решение уравнения требует получить 8 критериев подобия. Для получения этих критериев было составлено следующее уравнение:

, (2.8)

Это уравнение было преобразовано в следующий вид:

.(2.9)

где – обозначение каждого критерия подобия.

Из уравнения 2.7, необходимо было выбрать пять переменных с независимыми размерностями. Под переменными с независимыми размерностями понимают параметры, которые представляют собой физические величины с различными единицами измерения и не могут быть преобразованы друг в друга. В итоге в качестве переменных с независимыми размерностями были выбраны: диаметр корпуса глушителя, скорость частицы газа (), плотность газа (), сила тока *I* и сила света ( *J*v).

Затем составлено персональное уравнение для 8 критериев подобия ,. Выбранные пять независимых переменных () были задействованы в каждом уравнении критерия π. Остальные переменные, а именно: по одному вошли в состав уравнения критериев π. Поскольку показатели степени пяти основных переменных неизвестны, они в уравнении обозначены следующими символами: . А показатели степени остальных переменных принято равным -1. Тогда персональное уравнение каждого критерия подобия представлено в следующем виде:

, (2.10)

, (2.11)

, (2.12)

, (2.13)

, (2.14)

, (2.15)

, (2.16)

. (2.17)

В ходе решения этих уравнений вместо переменных были подставлены их формулы размерности. Такое преобразование переменных позволило определить их показатели степеней, которые в свою очередь позволяют в правильном соотношении составить критерии подобия.

Представлена методика расчета первого критерия подобия :

, (2.18)

Показатели степени с одинаковыми размерностями были сложены в один ряд:

*,* (2.19)

Затем из совокупности показателей степеней была составлена система уравнений. Для того чтобы составляемый критерий подобия и соотношение параметров было равно единице, совокупность их показателей равно нулю:

, (2.20)

Решение этой системы позволили определить значения неизвестных величин: .

Подставляя полученные значения показателей степеней обратно в уравнение (2.10) в итоге был получен первый критерий подобия:

. (2.21)

Был проведен аналогичный расчет для остальных уравнений, определяющие критерия подобия.

Проведен расчет для второго критерия подобия:

, (2.22)

,(2.23)

, (2.24)

Отсюда: , .

Получен второй критерий подобия:

. (2.25)

Проведен расчет для третьего критерия подобия:

, (2.26)

,(2.27)

, (2.28)

Отсюда: , .

Получен третий критерий подобия:

. (2.29)

Проведен расчет для четвертого критерия подобия:

, (2.30)

,(2.31)

, (2.32)

Отсюда: , .

Получен четвертый критерий подобия:

. (2.33)

Проведен расчет для пятого критерия подобия:

, (2.34)

, (2.35)

, (2.36)

Отсюда: ,

Получен пятый критерий подобия:

. (2.37)

Проведен расчет для шестого критерия подобия:

, (2.38)

, (2.39)

, (2.40)

Отсюда: ,

Получен шестой критерий подобия:

. (2.41)

Проведен расчет для седьмого критерия подобия:

, (2.42)

,(2.43)

, (2.44)

Отсюда: , .

Получен седьмой критерий подобия:

. (2.45)

Проведен расчет для восьмого критерия подобия:

, (2.46)

,(2.47)

, (2.48)

Отсюда: , .

Получен восьмой критерий подобия:

. (2.49)

В итоге были получены 8 критериев подобия из составленного ранее уравнения (2.7):

, (2.50)

Полученное число критериев подобия соответствует теореме π. Это означает, что уравнение было составлено верно, а полученные критерии подобия позволяют оценить работу электроимпульсного глушителя.

Далее уравнение (2.50) было преобразовано таким образом, что критерий был перемещен на другую сторону уравнения.

. (2.51)

Используя пропорциональность между параметрами , шестой критерий был изменен на критерий Рейнольдса *Re*.

, (2.52)

Число полученных критериев подобия слишком велико. Дабы не усложнять дальнейшие расчеты, их число было сокращено посредством взаимного соотношения или произведения их друг на друга.

Рассмотрено соотношение между первым и вторым критериями. В итоге был получен следующий критерий:

, (2.53)

Далее между собой было рассмотрено соотношение четвертого и пятого критериев:

, (2.54)

После полученный критерий (2.54) был сокращен с седьмым критерием -подобия:

, (2.55)

В итоге после всех сокращений были получены следующие критерии подобия, зависящие от соотношения дымности газа после и до воздействия электроимпульсом:

. (2.56)

Таким образом были получены пять критериев подобия:

, (2.57)

, (2.58)

, (2.59)

, (2.60)

. (2.61)

С целью подтверждения правильности полученных критериев, в качестве примера были расскрыты размерности первого критерия *k*1:

*.*

В итоге размерности первого критерия были сокращены и сам критерий стал равен единице, что доказывает правильность его составления. По такому примеру были проверены все остальные критерии подобия и их правильность была подтверждена.

Полученные критерии подобия теоретически описывают работу электроимпульсного глушителя. Критерий в виде характеризует продуктивность работы электроимпульсного глушителя соотношением мощностей, а именно отношением мощности работы электроимпульсного глушителя к мощности сопротивления его работе. Второй критерий описывает режим прохождения газа внутри глушителя, а именно его переход от ламинарного режима к турбулентному. Третий критерий учитывает геометрические параметры электроимпульсного глушителя, необходимых для составления методики инженерного расчета конструкции глушителя. Четвертый критерий позволяет определить на каких соотношениях частоты электроимпульса и угловой скорости двигателя работа электроимпульсного глушителя будет считаться оптимальной. Пятый критерий учитывает соотношение показателей дымности газа с и без воздействия электроимпульсом. Этот критерий является критерием оптимальности и позволяет определить эффективность работы электроимпульсного глушителя, а именно степень очистки выхлопного газа. Следовательно критерий задает условие проведения экспериментальных исследований, которое заключается в определении показателей дымности выхлопного газа до и после воздействия электроимпульсом. Эти исследования предполагают варьирование параметрами, такие как расстояние между электродами и частота электроимпульсов, а также учитывает изменение угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания. Таким образом, критерий ставит задачу определения эффективности работы электроимпульсного глушителя через анализ влияния его параметров на уменьшение дымности выхлопных газов.

2.4 Цель и задачи экспериментальных исследований на экспериментальных стендах электроимпульсного глушителя

Эффективность работы электроимпульсного глушителя будет оцениваться по выбранному критерию оптимальности, который описывает соотношение показателей дымности после воздействия и до воздействия на газ электроимпульсом. Следовательно для определения эффективности работы электроимпульсного глушителя необходимо провести соответствующие экспериментальные исследования.

В научной статье (Studying the process of the internal combustion engine exhaust gas purification by an electric pulse, Journal of Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 2022) нами были представлены результаты экспериментальных исследований на металлическом полноразмерном стенде глушителя по определению показателей дымности газа после и до воздействия на него электроимпульсом [12, c.281]. Показатели дымности газа были получены в зависимости от числа оборотов коленчатого вала двигателя, результаты которых представлены на графике (рисунок 2.7).

Рисунок 2.7 – Показатели дымностей газа в зависимости от частоты оборотов коленчатого вала двигателя

Из графика следует, что дымность газа после воздействия на него электроимпульсом имеет меньшие значения, чем у показателей дымности газа, не подвергавшиеся воздействию со стороны электроимпульса. Однако в представленных результатах экспериментальных исследований помимо числа оборотов коленчатого вала двигателя не учитывались такие важные параметры, как расстояние между электродами и частота электроимпульса, которые, как было установлено в разделе 2.1 имеют непосредственное влияние на качество возникновения и продолжительность коронного разряда в газе и на стабильное прохождение процесса ионизации, обеспечивающие эффективность очистки газа. Кроме того регулируя этими параметрами вполне возможно установить оптимальный режим работы электроимпульсного глушителя. Например, варируя расстоянием между электродами можно определить оптимальный промежуток межэлектродного пространства при котором возникает коронный разряд и осуществляется высокая степень очистки газа. Также подбирая значение частоты электроимпульса возможно предотвратить случаи перехода коронного разряда в искровой разряд, который приводит к нарушению стабильного режима работы электроимпульсного глушителя. Следовательно целесообразным является провести экспериментальные исследования по определению показателей дымности газа с изменением параметров расстояний между электродами и частоты электроимпульса.

Цель экспериментальных исследований заклчючалась в определении возможности изменения показателей дымности газа в зависимости от регулирования параметрами расстояния между электродами Δ, частоты импульса *f* и с учетом изменения угловой скорости вращения коленчатого вала *ω*.

Цель была достигнута решением следующих задач:

- разработкой стендов, методики экспериментов, определения числа опытов;

- анализом полученных результатов и сравнением их аналитическими данными.

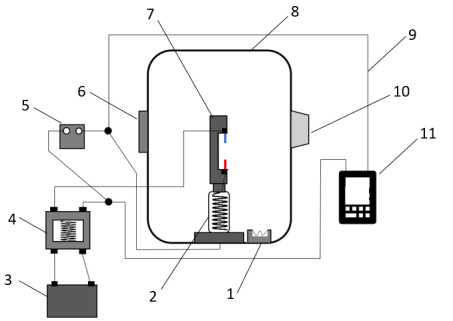
Эксперимент проводился в два этапа на двух стендах: лабораторном и полноразмерном.

Исследования на лабораторном стенде позволили определить дымность оптическим путем, без влияния работы двигателя на измерения. Это позволило избежать систематических ошибок за счет регулирования только параметрами Δ и *f*.

Исследования на втором полноразмерном стенде позволили определить зависимости дымности газа от частоты электроимпульса, расстояния между электродами и числа оборотов коленчатого вала двигателя.

2.5 Оборудование и измерительная аппаратура лабораторного стенда

Для определения возможности изменения показателей дымности газа от параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса нами был разработан лабораторный стенд с прозрачными диэлектрическими стенками. Схема стенда приведена на рисунке 2.8.



1 – источник дыма; 2 – высоковольтная катушки зажигания; 3 – аккумуляторная батарея; 4 – генератор высокого напряжения; 5 – регулятор частоты; 6 – люксметр; 7 – свеча зажигания; 8 – емкость для накопления дыма; 9 – соединительные провода; 10 – источник света; 11 – осциллограф.

Рисунок 2.8 – Схема экспериментального стенда

Стенд (рисунок 2.9) состоит из емкости для накопления дыма 1, высоковольтной катушки зажигания 3, свечи зажигания 2, аккумуляторной батареи 9, генератора электрических импульсов 8, регулятора частоты и скважности 5, источника дыма 7, соединительных проводов 4, осциллографа 6.

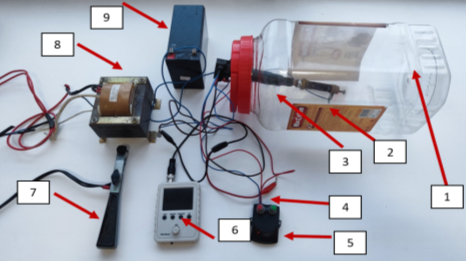


Рисунок 2.9 – Экспериментальный стенд для определения степени очистки газа

Внутри ёмкости размещалась катушка со свечой зажигания. Ёмкость заполнялась дымом от разогретого до высокой температуры моторного масла 10w40. Для питания высоковольтной катушки использовался генератор электрических импульсов собранный на базе микросхемы КР1006ВИ1 (NE555), работающей в режиме широтно-импульсной модуляции с возможностью регулировки частоты (от 15 до 35 Гц) на осциллографе (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Осциллограф марки «DSO150»

Питание стенда осуществлялось от 12-тивольтового аккумулятора. На экспериментальном стенде использовалась автомобильная свеча зажигания марки NGK Iridium BKR5EIX-11 (рисунок 2.11). На нем электроды расположены таким образом, чтобы была возможность изменять расстояние между ними.



Рисунок 2.11 – Свеча зажигания марки NGK Iridium BKR5EIX-11

Было проведено измерение показателей освещенности газа с помощью приборов источника света и люксметра, которые были расположены на противоположных сторонах накопительной емкости. В качестве люксметра был использован смартфон с установленным программным обеспечением «Lux Light Meter Pro» (рисунок 2.12). А в качестве источника света был использован светодиодный фонарь.

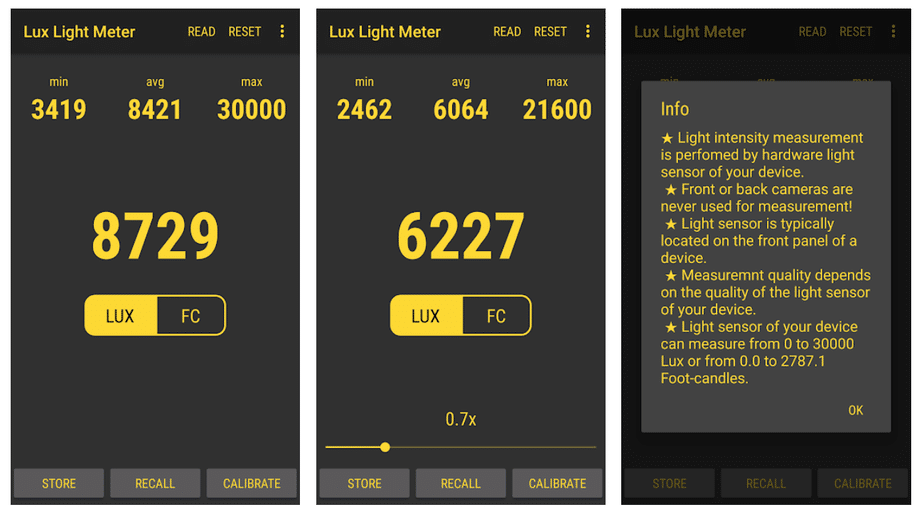


Рисунок 2.12 – Интерфейс программного обеспечения

«Lux Light Meter Pro» на смартфоне

Экспериментальные исследования на стенде проходили следующим образом. В емкость лабораторного стенда, поступал дым от источника дыма. Источник дыма имеет специальную спираль, которая изначально была разогрета до определенной температуры, способствующая разжиганию моторного масла. Когда на спираль попадала капля моторного масло, это приводило к образованию дыма, который впоследствии поступал в накопительную емкость. Затем проводились первые замеры показателей освещенности емкости до воздействия электроимпульсом. Замеры осуществлялись с помощью источника света (светодиодный фонарь), который освещал накопительную емкость и люксметра (измерительное приложение смартфона «Lux Light meter Pro»), который фиксировал значения освещенности. Затем от аккумуляторной батареи через генератор высокого напряжения, по катушке зажигания на свечу в которой электроды были заранее установлены на определенное расстояние, подавался электрический разряд высокого напряжения. В ходе подачи этого напряжения регулировались значения частоты электроимпульса с помощью регулятора. Значение частоты электроимпульса были отображены на осциллографе. После подачи электроимпульса с определенной частотой в емкости наблюдался процесс ионизации и очистки дыма. В это время проводились замеры показателей освещенности в течении 60 секундного воздействия электроимпульса на дым. В итоге были получены показатели освещенности дыма до и после воздействия на него электроимпульсом в накопительной емкости. Порядок эксперимента повторялся аналогичным образом несколько раз, но с изменением значений параметров частоты электроимпульса и расстояния между электродами. Весь процесс проведения эксперимента снимался на видеокамеру, а результаты заносились в журнал наблюдений.

2.6 План, методика проведения и предварительные результаты эксперимента на лабораторном стенде

Методика проведения экспериментальных исследований основана на получении экспериментальных значений показателя освещенности дыма (газа). Освещенность газа в накопительной ёмкости была измерена до и после воздействия на него электроимпульсом. Время воздействия электроимпульса на газ составило 60 с и на каждом интервале 15 с были измерены показатели его освещенности. В таблице 2.3 представлен план проведения экспериментальных исследований на лабораторном стенде.

Таблица 2.3 – План эксперимента на лабораторном стенде

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Частота  *f*, Гц | Расстояние Δ, м | | | | |
| 0,012 | 0,015 | 0,018 | 0,021 | 0,024 |
| 15 | *D11* | *D12* | *D13* | *D14* | *D15* |
| 18 | *D21* | *D22* | *D23* | *D24* | *D25* |
| 21 | *D31* | *D32* | *D33* | *D34* | *D35* |

Подробный план с описанием порядка проведения эксперимента включающий 15 опытов отнесен в приложение Б диссертации. В качестве примера дана таблица 2.4.

Таблица 2.4 – План эксперимента

|  |  |
| --- | --- |
| Этап | Операции |
| 1 | 2 |
| Первый этап  при *f*1=15 Гц  =0,012 м | 1. Произвести замер освещенности емкости до наполнения его дымом |
| 2.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 3. Нагреть спираль источника дыма |
| 4.Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 5. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с. |
| 6. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 7.Установить частоту электроимпульса на *f*1=15 Гц и расстояние между электродами на =0,012 м |
| 8. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 9. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 сна каждом интервале 15 с . |
| 10. Выпустить дым из ёмкости |

Были применены методы математической статистики, которые позволили определить необходимое число параллельных опытов для проведения экспериментальных исследований на лабораторном стенде. Результаты расчетов подробно описаны в Приложении В [156,157].

Процесс проведения экспериментальных исследований на лабораторном стенде представлены на рисунках 2.13-2.16.



Процесс заполнения емкости газом

Рисунок 2.13– Заполнение емкости лабораторного стенда газом

Процесс установления частоты электриомпульса

Процесс установления расстояний между электродами

Рисунок 2.14– Установление показателей параметров расстояния между электродами и частоты



Наблюдение за процессом очистки газа под действием электроимпульса в течении 60 с при установленных значениях параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса

Рисунок 2.15– Наблюдение за процессом очистки газа под действием электроимпульса в течении 60 с



Процесс записи и фиксирования значений изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с.

Рисунок 2.16 – Запись экспериментальных значений освещенности газа в течении 60 с воздействия электроимпульсом

Полученные результаты экспериментальных исследований по показателям освещенности газа приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты экспериментальных исследований на лабораторном стенде электроимпульсной очистки газов

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Расстояние  между  электродами  , (м) | Начальная освещенность емкости,  Eисх (lx) | Частота  электрода  ,(Гц) | Освещенность, *E* лк | | | | |
| t0=0 с | t1=15 с | t2=30 с | t3=45 с | t4=60 с |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0,012 | 23 600 | 15,906 | 482 | 711 | 797 | 890 | 976 |
| 2 | 0,012 | 23 260 | 20,790 | 557 | 706 | 785 | 870 | 983 |
| 3 | 0,012 | 23 730 | 21,795 | 626 | 749 | 841 | 944 | 1058 |
| 4 | 0,015 | 23 570 | 15,906 | 626 | 852 | 988 | 1150 | 1410 |
| 5 | 0,015 | 24 160 | 20,811 | 535 | 670 | 755 | 870 | 985 |
| 6 | 0,015 | 23 446 | 21,997 | 443 | 639 | 732 | 824 | 931 |
| 7 | 0,018 | 24 510 | 15,889 | 862 | 1269 | 1483 | 1689 | 1981 |
| 8 | 0,018 | 23 285 | 20,725 | 493 | 694 | 819 | 940 | 1114 |
| 9 | 0,018 | 23 670 | 21,997 | 432 | 618 | 737 | 894 | 1121 |
| 10 | 0,021 | 23 832 | 15,889 | 475 | 736 | 984 | 1387 | 1831 |
| 11 | 0,021 | 22 370 | 20,790 | 407 | 681 | 879 | 1118 | 1286 |
| 12 | 0,021 | 22 235 | 21,975 | 424 | 636 | 862 | 1202 | 1630 |
| 13 | 0,024 | 22 730 | 15,839 | 506 | 954 | 1986 | 4624 | 7387 |
| 14 | 0,024 | 20 977 | 20,790 | 449 | 923 | 2015 | 4098 | 6705 |
| 15 | 0,024 | 20 840 | 21,975 | 624 | 1394 | 2669 | 5067 | 8078 |

Результаты экспериментальных исследований показывают, что чем больше расстояние между электродами и чем больше частота воздействия электроимпульса, тем выше показатели освещенности газа. Самые высокие показатели освещенности газа были зафиксированы на самых больших значениях параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса. Кроме того, чем больше продолжительность времени воздействия электрического импульса на газ, тем выше показатели его освещенности, что в свою очередь свидетельствует о положительном влиянии электрического импульса на процесс очистки газа.

2.7 Анализ экспериментальных результатов экспериментальных исследований на лабораторном стенде

Полученные экспериментальные данные по освещенности E позволили рассчитать коэффициент прозрачности газа α. Коэффициент прозрачности, или коэффициент пропускания света, определяет, насколько газ пропускает свет через себя в процессе очистки. Высокие значения этого коэффициента после очистки указывают на успешное удаление загрязнений из газа, так как они свидетельствуют о снижении концентрации вредных частиц. Коэффициент прозрачности измеряется в диапазоне от 0 до 1, где 0 означает полное поглощение света газом, а 1 - полный пропуск света без поглощения.

Коэффициент прозрачности тесно связан с коэффициентом поглощения света *β*. Этот коэффициент указывает, какая доля света поглощается газом при его прохождении через него. Он также измеряется от 0 до 1, где 0 означает полное поглощение света, а 1 - полное прохождение света. Связь между этими коэффициентами выражается следующим образом: чем выше коэффициент поглощения света, тем ниже коэффициент прозрачности, и наоборот.

Показатели дымности выхлопных газов в свою очередь определяется через коэффициент пропускания света, который является эквивалентным коэффициенту прозрачности. Связь между показателем дымности и коэффициента прозрачности следующий: Чем меньше света проходит через газ (чем меньше коэффициент пропускания(прозрачности)), тем выше будет значение дымности и наоборот [158].

Таким образом, поскольку коэффициент прозрачности обратно пропорционален коэффициенту поглощения света и показателю дымности, можно сделать вывод о прямой связи между коэффициентом поглощения света и показателем дымности. Чем выше коэффициент поглощения света, тем больше света поглощается при его прохождении через газ, что характеризуется показателями дымности. Повышение дымности указывает на более высокую степень загрязнения газа вредными частицами.

В контексте оценки работы электроимпульсного глушителя, отношение показателей интенсивности светового потока до и после воздействия электроимпульсом эквивалентно отношению показателей дымности после и до воздействия электроимпульса на газ. Другими словами, параметр коэффициента светопоглощения газа (β) приравнивается самому показателю соотношений дымности.

, (2.62)

Следовательно для определения показателей дымности газа на лабораторном стенде была разработана методика обработки экспериментальных данных, которая основывается на взаимосвязи между параметрами освещенности, коэффициентов прозрачности газа и поглощения света газом.

Согласно методике обработки экспериментальных данных освещенности во время проведения экспериментов, точечный источник света излучал световой поток Фн, который проходя через обе стенки емкости стенда ослабевал на величину Фс. Отсюда определяется выходной световой поток до воздействия н газ электроимпульсом, который равен:

(2.63)

где – величина начального светового потока от точечного источника света;

– величина потери светового потока при прохождении через емкость.

При наличии в ёмкости светопоглощающих частиц, выходной световой поток на выходе в i-й момент времени определяется через разницу показателей параметров и :

, (2.64)

где – световой поток, поглощаемый взвешенными частицами.

Из уравнения (2.64) следует, что световой поток, поглощаемый взвешенными частицами определяется как:

. (2.65)

Отношение Фчі/Фв соответствует коэффициенту поглощения света взвешенными частицами газа , который характеризует концентрацию взвешенных светопоглощающих частиц в объеме газа ёмкости [159]:

, (2.66)

Световой поток по определению равен произведению освещенности *E*, на площадь площадки на которую падает свет :

,

. (2.67)

где – показатели освещенности газа после воздействия на газ электроимпульсом;

– показатели освещенности газа до воздействия на газ электроимпульсом:

- площадь площадки, на которую падает световой поток .

Так как при проведении экспериментов величина σ оставалась постоянной, то формула коэффициента светопоглощения выглядит следующим образом:

, (2.68)

Отсюда соотношение показателей освещенности соответствует значению коэффициента прозрачности и определяется как:

, (2.69)

и с учетом выше изложенных зависимостей [160,161]:

. (2.70)

Выявленные зависимости позволили рассчитать коэффициент прозрачности α газа по полученным экспериментальным данным освещенности. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты расчетов по изменению коэффициента прозрачности газа ( в зависимости от показателей освещенности

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Но-мер  опыта | Расстояние между электро-дами, (м) | Частота электро-импульса  (Гц) | | Коэффициент прозрачности - | | | | |
| Временной промежуток | | | | t0=0 с | t1=15 с | t2=30 с | t3=45 с | t4=60 с |
| 1 |  | | f1=15,906 | 0,02042 | 0,03013 | 0,03377 | 0,03771 | 0,04136 |
| 2 |  | | f2=20,790 | 0,02395 | 0,03035 | 0,03375 | 0,03740 | 0,04226 |
| 3 |  | | f3=21,795 | 0,02638 | 0,03156 | 0,03544 | 0,03978 | 0,04458 |
| 4 |  | | f1=15,906 | 0,02656 | 0,03615 | 0,04192 | 0,04879 | 0,05982 |
| 5 |  | | f2=20,811 | 0,02214 | 0,02773 | 0,03125 | 0,03601 | 0,04077 |
| 6 |  | | f3=21,997 | 0,01889 | 0,02725 | 0,03122 | 0,03514 | 0,03971 |
| 7 |  | | f1=15,889 | 0,03517 | 0,05177 | 0,06051 | 0,06891 | 0,08082 |
| 8 |  | | f2=20,725 | 0,02117 | 0,02980 | 0,03517 | 0,04037 | 0,04784 |
| 9 |  | | f3=21,997 | 0,01825 | 0,02611 | 0,03114 | 0,03777 | 0,04736 |
| 10 |  | | f1=15,889 | 0,01993 | 0,03088 | 0,04129 | 0,05820 | 0,07683 |
| 11 |  | | f2=20,790 | 0,01819 | 0,03044 | 0,03929 | 0,04998 | 0,05749 |
| 12 |  | | f3=21,975 | 0,01907 | 0,02860 | 0,03877 | 0,05406 | 0,07331 |
| 13 |  | | f1=15,839 | 0,02226 | 0,04197 | 0,08737 | 0,20343 | 0,32499 |
| 14 |  | | f2=20,790 | 0,02140 | 0,04400 | 0,09606 | 0,19536 | 0,31964 |
| 15 |  | | f3=21,975 | 0,02994 | 0,06689 | 0,12807 | 0,24314 | 0,38762 |

По результатам расчетов построен график изменения показателей коэффициента прозрачности газа от времени воздействия электроимпульса (рисунок 2.17).

Рисунок 2.17 – График изменения показателей коэффициента прозрачности газа в зависимости от времени воздействия электроимпульса

График показывает изменение коэффициента прозрачности газа (𝛼) в зависимости от времени воздействия на газ электроимпульсом (t) при фиксированных параметрах: Δ=0,024 м и *f*=21,975 Гц. Из графика следует, что электроимпульсное воздействие на газ приводит к постепенному увеличению его прозрачности, что указывает на снижение уровня загрязняющих частиц. Наиболее значительное увеличение прозрачности происходит в последние 15 секунд воздействия. Таким образом, результаты показывают, что электроимпульсное воздействие эффективно улучшает прозрачность газа, и процесс очистки становится более выраженным по мере увеличения времени воздействия.

Затем по зависимости (2.70) и по полученным значениям коэффициента прозрачности газа α были рассчитаны значения коэффициента поглощения света газом , которые соответствуют показателям соотношения дымности газа. Результаты расчетов представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты расчетов по определению коэффициента поглощения света газом (соотношение дымности газа)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер  опыта | Расстояние между электродами | Частота электро-импульса | Коэффициент прозрачности α  после воздействия на газ электроимпульсом в течении 60 с | Коэффициента поглощения света газом β  (Соотношение дымностей газа *D2/D1*) |
| 1 | ∆1=0,012 м | f1=15,906 | 0,04136 | 0,95864 |
| 2 | ∆1=0,012 м | f2=20,790 | 0,04226 | 0,95774 |
| 3 | ∆1=0,012 м | f3=21,795 | 0,04458 | 0,95542 |
| 4 | ∆2=0,015 м | f1=15,906 | 0,05982 | 0,94018 |
| 5 | ∆2=0,015 м | f2=20,811 | 0,04077 | 0,95923 |

Продолжение таблицы 2.7

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер  опыта | Расстояние между электродами | Частота электро-импульса | Коэффициент прозрачности α  после воздействия на газ электроимпульсом в течении 60 с | Коэффициента поглощения света газом β  (Соотношение дымностей газа *D2/D1*) |
| 6 | ∆2=0,015 м | f3=21,997 | 0,03971 | 0,96029 |
| 7 | ∆3=0,018 м | f1=15,889 | 0,08082 | 0,91918 |
| 8 | ∆3=0,018 м | f2=20,725 | 0,04784 | 0,95216 |
| 9 | ∆3=0,018 м | f3=21,997 | 0,04736 | 0,95264 |
| 10 | ∆4=0,021 м | f1=15,889 | 0,07683 | 0,92317 |
| 11 | ∆4=0,021 м | f2=20,790 | 0,05749 | 0,94251 |
| 12 | ∆4=0,021 м | f3=21,975 | 0,07331 | 0,92669 |
| 13 | ∆5=0,024 м | f1=15,839 | 0,32499 | 0,67501 |
| 14 | ∆5=0,024 м | f2=20,790 | 0,31964 | 0,68036 |
| 15 | ∆5=0,024 м | f3=21,975 | 0,38762 | 0,61238 |

По результатам расчетов наилучшие значения показателей соотношения дымности газа были получены при частоте электроимпульса *f*3=21,975 и при расстоянии между электродами ∆5=0,024 м.

Далее были построены раздельные графики изменения показателей соотношения дымности газа или показателя критерия оптимальности работы лабораторного стенда от параметров расстояния между электродами и частоты электроиимпульса (рисунки 2.18 и 2.19).

Рисунок 2.18 – График изменения соотношения дымностей газа (*D2/D1*)

в зависимости от расстояния между электродами

Из графика на рисунке 2.18 следует что при расстоянии между электродами от 0,001 до 0,0021 м качественного скачка в изменении значений дымности газа не происходило. Однако при возрастании расстояния между электродами от 0,0021 до 0,0024 м менялась физическая картина процесса воздействия электроимпульса, в котором один вид разряда менялся на другой и наблюдался резкий скачок в уменьшении значений дымности газа. Это объясняется тем, что при значении расстояний между электродов от 0,012 до 0,0021 м величины напряженности было недостаточно для перехода искрового разряда в коронный, и только с увеличением расстояния между электродами до 0,0024 м возник переход разряда и очистка газа стала намного эффективнее.

На рисунке 2.19 представлен график изменения дымности газа в зависимости от частоты электроимпульса

Рисунок 2.19 – График изменения дымности газа в зависимости от частоты электроимпульса

Из графика следует, что диапозон частоты электроимпульса от 15 до 20 Гц оказался не существенным в процессе воздействия на газ электроимпульсом, так как показатели критерия оптимальности остались практически неизменными. Однако с увеличением частоты электроимпульса больше чем на 20 Гц наблюдалось постепенное уменьшение показателей критерия оптимальности.

Полученные графики доказывают, что расстояние между электродами и частота электроимпульса оказывают существенное влияние на процесс очистки газа. Наименьшие показатели критерия оптимальности свидетельствуют о повышении степени очистки примерно на 40%. Однако они не позволяют определить оптимальную зависимость между регулируемыми параметрами. Далее был построен трехмерный график изменения показателей критерия оптимальности работы лабораторного стенда от совместного влияния параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса (рисунок 2.20).

Рисунок 2.20 – Показатели критерия оптимальности от параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса

По полученному графику следует, что при совместном воздействии частоты электроимпульса и расстояния между электродами на газ показатель дымности начинает изменяться примерно в диапозоне расстояниий между электродами от 0,0018 до 0,0024 м. Однако по этому графику не представляется возможным определить оптимальную зависимость между параметрами частоты электроимпульса и расстояния между электродами, при совместном воздействии которых достигаются наименьшие показатели критерия оптимальности работы лабораторного стенда. Следовательно для того чтобы определить оптимальную зависимость между регулирующими параметрами нами было предложено рассматривать их через два критерия, описываемые их соотношением и произведением:

и ., (2.71)

Нами было сделана попытка использовать эти критерия для определения оптимального диапозона дымности по величинам и *f*. При этом величина и считаем постоянными. Отсюда нами было рассмотрено два показателя:

и . (2.72)

Физический смысл величины – скорость прохождения электроимпульсом расстояния S. Величина S равна произведению на количество циклов *n*, то есть:

, (2.73)

, (2.74)

где .

Физический смысл величины , равный

. (2.75)

заключается во времени за которое импульс преодолевает расстояние .

Согласно полученным зависимостям были определены значения параметров и посредством произведения и соотношения показателей расстояния между электродами и частоты электриомпульса между собой. Результаты проведенных расчетов представлены в таблицах 2.8 и 2.9.

Таблица 2.8 – Данные для определения параметра k1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Расстояние между электродами, (м) | 0,012 | 0,015 | 0,018 | 0,021 | 0,024 |
| Частота электроимпульса, (Гц) | Параметр k1,  ∆‧ƒ (м/с) | | | | |
| 15,839 | 0,190068 | 0,237585 | 0,285102 | 0,332619 | 0,380136 |
| 20,79 | 0,24948 | 0,31185 | 0,37422 | 0,43659 | 0,49896 |
| 21,795 | 0,26154 | 0,326925 | 0,39231 | 0,457695 | 0,52308 |

Таблица 2.9 – Данные для определения параметра k2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Расстояние между электродами, (м) | 0,012 | 0,015 | 0,018 | 0,021 | 0,024 |
| Частота электроимпульса, (Гц) | Параметр k2,  ∆/ƒ (м‧с) | | | | |
| 15,839 | 0,000754 | 0,000943 | 0,001132 | 0,00132 | 0,001509 |
| 20,79 | 0,000577 | 0,000722 | 0,000866 | 0,00101 | 0,001154 |
| 21,795 | 0,000551 | 0,000688 | 0,000826 | 0,000964 | 0,001101 |

Затем по полученным значениям параметров k1 и k2 был проведен регрессионно-корреляционный анализ экспериментальных значений соотношения показателей дымности (критерия оптимальности работы лабораторного стенда) [162,163]. Результаты проведенного регрессионно-корреляционного анализа представлены в таблицах 2.10-2.11.

Таблица 2.10 – Результаты аппроксимации функции показателей дымности газа от параметра k1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Вид регресии | Уравнение регрессии | Коэффи-циент корреля-ции | Коэффи-циент детер-минации | Средняя ошибка аппрок-симации, % |
| 1 | Линейная |  | 0,84 | 0,71 | 9,91 |
| 2 | Квадратическая |  | 0,98 | 0,97 | 0,18 |
| 3 | Степенная |  | 0,72 | 0,53 | 12,34 |
| 4 | Показательная |  | 0,8 | 0,64 | 10,49 |
| 5 | Логарифмическая |  | 0,76 | 0,58 | 12 |
| 6 | Гиперболическая |  | 0,69 | 0,47 | 13,46 |
| 7 | Экспоненциальная |  | 0,8 | 0,64 | 10,49 |

Таблица 2.11 – Результаты аппроксимации функции дымности газа от параметра k2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Вид регресии | Уравнение регрессии | Коэффи-циент корреля-ции | Коэффи-циент детер-минации | Средняя ошибка аппрок-симации, % |
| 1 | Линейная |  | 0,95 | 0,9 | 4,26 |
| 2 | Квадратическая |  | 0,98 | 0,97 | 0,17 |
| 3 | Степенная |  | 0,87 | 0,76 | 6,68 |
| 4 | Показательная |  | 0,93 | 0,87 | 4,71 |
| 5 | Логарифмическая |  | 0,9 | 0,81 | 6,22 |
| 6 | Гиперболическая |  | 0,83 | 0,68 | 8,15 |
| 7 | Экспоненциальная |  | 0,93 | 0,87 | 4,71 |

Из анализа таблиц 2.10 и 2.11 видно, что квадратическое уравнение регрессии наилучшим образом описывает зависимость изменения показателей критерия оптимальности от параметров k1 и k2. Это подтверждается высокими значениями коэффициентов корреляции и детерминации, а также низкими значениями средней ошибки аппроксимации.

, (2.76)

. (2.77)

Экспериментальные и эмпирические значения показателей дымности газа от параметров k1 и k2 приведены в таблицах 2.12 и 2.13.

Таблица 2.12 – Показатели дымности от k1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр к1, ∆‧ƒ (м/с) | 0,190068 | 0,37422 | 0,52308 |
| Показатель критерия оптимальности, D2/D1  (экспериментальные значения) | 0,95864 | 0,95216 | 0,61238 |
| Показатель критерия оптимальности, D2/D1  (по уравнению регрессии) | 0,96270 | 0,95553 | 0,61512 |

Таблица 2.13 – Показатели дымности от k2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр к2, ∆/ƒ (м‧с) | 0,000551 | 0,000866 | 0,001509 |
| Показатель критерия оптимальности, D2/D1  (экспериментальные значения) | 0,95542 | 0,95216 | 0,67501 |
| Показатель критерия оптимальности, D2/D1  (по уравнению регрессии) | 0,96270 | 0,95553 | 0,61512 |

На основе полученных данных построены графики зависимостей параметров k1 и k2 от показателей критерия оптимальности (рисунки 2.21 и 2.22).

Рисунок 2.21 – График зависимости сравнения экспериментальных и   
теоериических кривых по параметру k1

Рисунок 2.22 – График зависимости сравнения экспериментальных и теоретических кривых по параметру k2

Как следует из графиков (рисунки 2.21 и 2.22) минимальное значение показателей критерия оптимальности (cоотношения показателей дымности) достигается при и .

Составлена система двух линейных уравнений для этих интервалов:

, (2.78)

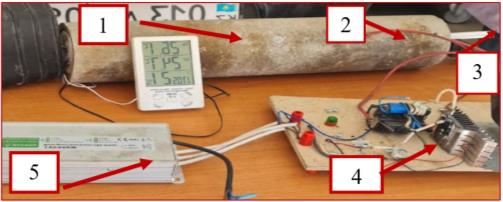
решение которого позволило определить оптимальные значения параметров расстояния и частоты для лабораторного стенда:

и .

Таким образом результаты регрессионно-корреляционного анализа с совместным сравнением показателей k1 и k2 в системе уравнений позволило определить оптимальный режим работы лабороторного стенда по очистке газов, посредством определения оптимальных значений параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса при которых достигается наименьшие значения показателей дымности газа. Однако полученные результаты нуждаются в подтверждении экспериментальными исследованиями на полноразмерном стенде, так как на лабораторном стенде не было учтено влияние параметра угловой скорости вращения (числа оборотов) коленчатого вала двигателя. От этого параметра зависит с каким объемом и с какой скоростью газ поступает в электроимпульсный глушитель. Также по ранее представленному анализу взаимосвязи параметров частоты и расстояния между электродами вполне возможно установить оптимальные их зависимости и на полноразмерносм стенде. В связи с этим необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования на полноразмерном стенде по определению показателей дымности газа в зависимости от изменения параметров частоты оборотов двигателя с учетом регулируемых параметров расстояния и частоты.

2.8 Оборудование и измерительная аппаратура полноразмерного стенда

С целью определения оптимального режима работы электроимпульсного глушителя в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя и с учетом параметров расстояния между электродадми и частоты электроимпульса нами был разработан полноразмерный стенд электроимпульсного глушителя (рисунок 2.23).

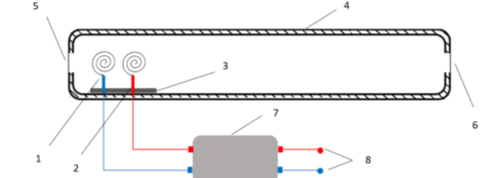


1 – асбестовый корпус глушителя; 2 – электроды, размещенные внутри глушителя;

3- планка-рейка для изменения расстояния между электродами; 4 – генератор высокого напряжения; 5 – источник питания.

Рисунок 2.23 - Полноразмерный стенд электроимпульсного глушителя

Схема полноразмерного стенда электроимпульсного глушителя представлена на рисунке 2.24.



1 – анод; 2 – катод; 3- планка-рейка для изменения расстояния между электродами;

4 – асбестовый корпус глушителя; 5 – впускное отверстие; 6 – выпускное отверстие;

7 – генератор высокого напряжения; 8 – источник питания.

Рисунок 2.24 - Схема полноразмерного стенда электроимпульсного глушителя

Полноразмерный стенд (рисунок 2.25) состоит из цилиндрического корпуса 1, двух электродов, которые вмонтированы во внутрь корпуса 2, соединительных проводов к глушителю от генератора высокого напряжения 3, шланга к впускному отверстию глушителя для прохождения выхлопных газов, 5 генератора высокого напряжения, 6 осциллографа, ноутбука 7; термометра 8; выпускного шланга от выпускного отверстия глушителя для выхода выхлопных газов в наружу и микроскопа 10.



Рисунок 2.25 – Соединение полноразмерного электроимпульсного глушителя с автомобилем

Цилиндрический корпус глушителя выполнен из асбеста, так как этот материал по сравнению с металлом имеет больше положительных характериристик благодаря своей низкой электропроводности, теплопроводимости и шумопоглощающей способности.

Ниже представлены основные преимущества асбеста перед металлом в качестве основного материала для разработки цилиндрического горпуса глушителя:

- асбестовые конструкции не меняют свою структуру при прошествии длительного промежутка времени и воздействии тепла и холода;

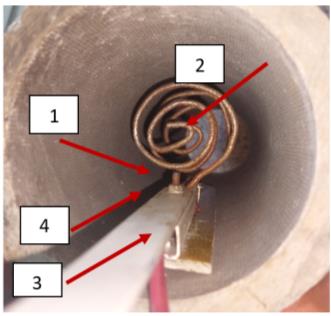
- стоимость асбестового материала намного меньше, чем цена на металл или пластик;

- асбест обладает низкой теплопроводностью, поэтому асбестовые трубы не промерзают в холодные периоды года;

- асбестовые конструкции имеют длительный срок эксплуатации. Повышенное сопротивление коррозии, обеспечивает их долговечность;

- асбест обладает низкой электропроводностью, что делает его высококачественным электроизоляционным материалом [164].

Внутри корпуса глушителя на специальной планке-рейке вмонтированы два электрода, на которые от генератора по высоковольтным проводам подается электрический ток высокого напряжения (рисунок 2.26).



1 – анод; 2 – катод; 3- планка-рейка для изменения расстояния между электродами; 4 – внутренняя поверхность корпуса глушителя

Рисунок 2.26– Расположение спиралевидных электродов внутри электроимпульсного глушителя

Электрическая схема высоковольтного генератора состоит из следующих элементов: трансформатор диодно-каскадный строчный (ТДКС), стабилитрон 1N5339BRLG, p-n-p транзистор TOSHIBA PNP 2SA1943. Технические характеристики генератора высокого напряжения представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14– Технические характеристики генератора высокого напряжения

|  |  |
| --- | --- |
| Показатели | Значение |
| Входное напряжение | 12 В |
| Выходное напряжение | 35000 В |
| Мощность преобразователя | 250 Вт |

Полноразмерный стенд дополнительно оснащен осциллографом для улавливания частоты электроимпульса в процессе очистки газа, термометром для определения температуры отработавшего газа, микроскопом для наблюдения за процессом переходом искрового разряда в коронный разряд и ноутбуком для визуального отображения процесса очистки газа на экране. В качестве измерительной аппаратуры показателей дымности был использован дымомер оптический BOSCH BEA 070 (рисунок 2.27).

# 

# Рисунок 2.27 – Дымомер оптический BOSCH BEA 070

Принцип действия дымомера основан на измерении пропускания света через дымовую среду оптическим методом. Обычно дымомеры используются для измерения концентрации твердых частиц (дыма) в газах. Отработавшие газы через пробоотборный зонд поступают в измерительную камеру(кювету). С одной стороны кюветы расположен источник, с другой — приемник света. Источник представляет собой светоизлучающий диод, который испускает свет с длиной волны 565 нм. На противоположной стороне камеры фотодиод принимает поступающий свет. На основе такого оптического излучения определяются показатели дымности газа.

2.9 План, методика проведения и предварительные результаты эксперимента на полноразмерном стенде

Сущность эксперимента заключалось в определении показателей дымности газа до воздействия и после воздействием электроимпульса в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя с регулированием параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса. Эксперименты проводились в два этапа: 1 этап – без воздействия на газ электроимпульсом, 2 этап – с воздействием на газ электроимпульсом и с установлением расстояний между электродами от 0,01 м до 0,006 м с шагом 0,02 м. План эксперимента представлен в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – План эксперимента

|  |  |
| --- | --- |
| № операции | Проводимые операции |
| **Подготовительный этап** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля и прогреть до рабочей температуры |
| 2 | Произвести подключение полноразмерного стенда к автомобилю |
| 3 | Подсоединить генератор к глушителю и сети 220 вольт |
| **1 этап. Определение дымности газа при750 об/мин**  **без воздействия и с воздействием электриомпульса** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля |
| 2 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 750 об/мин |
| 3 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 4 | Выключить зажигание ДВС |
| 5 | Установить расстояние между электродами на 0,01 м |
| 6 | Включить генератор высокого напряжения в полноразмерном стенде электроимпульсного глушителя |
| 7 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 8 | Выключить генератор |
| 9 | Выключить зажигание ДВС |
| 10 | Записать полученные результаты в журнал эксперимента |
| **2 этап. Определение дымности газа при 950 об/мин**  **без воздействия и с воздействием электриомпульса** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля |
| 2 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 750 об/мин |
| 3 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 4 | Выключить зажигание ДВС |
| 5 | Установить расстояние между электродами на 0,008 м |
| 6 | Включить генератор высокого напряжения в полноразмерном стенде электроимпульсного глушителя |
| 7 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 8 | Выключить генератор |
| 9 | Выключить зажигание ДВС |
| 10 | Записать полученные результаты в журнал эксперимента |
| **3 этап. Определение дымности газа при 950 об/мин**  **без воздействия и с воздействием электриомпульса** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля |
| 2 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 750 об/мин |
| 3 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 4 | Выключить зажигание ДВС |
| 5 | Установить расстояние между электродами на 0,006 м |
| 6 | Включить генератор высокого напряжения в полноразмерном стенде электроимпульсного глушителя |
| 7 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 8 | Выключить генератор |
| 9 | Выключить зажигание ДВС |
| 10 | Записать полученные результаты в журнал эксперимента |

Методами математической статистики расчетным путем предварительно было определено параллельное число опытов для проведения экспериментальных исследований на полноразмерном стенде электроимпульсного глушителя. Результаты расчетов представлены в приложении В.

Экспериментальные исследования на полноразмерном стенде проходили следующим образом. Осуществлялся запуск двигателя автомобиля и его прогрев до рабочей температуры. Производилось подключение полноразмерного стенда электроимпульсного глушителя к автомобилю. Подсоединялся генератор высокого напряжения к глушителю и сети 220 вольт. Подключение стенда к автомобилю осуществлялось через входное отверстие с помощью резинового шланга, подающий отработавшие газы из автомобиля. Задавалось число оборотов коленчатого вала двигателя. Диапозон изменения числа оборотов составило 750, 950 и 1280 об/мин. На каждом значении числа оборотов коленчатого вала двигателя с помощью оптического дымомера замерялись показатели дымности газа. После получения показателей дымности (без воздействия электроимпульса), занова задавались те же самые значения числа оборотов коленчатого вала двигателя и в зависимости от изменения их значений были получены показатели дымности газа, но уже с воздействием электрического импульса и с установлением расстояния между электродами. До воздействия на газ электроимпульсом предварительно расставлялись расстояния между электродами с помощью планки-рейки. Затем от генератора высокого напряжения подавался электрический ток в межэлектродное пространство, в ходе которого образовался коронный разряд у коронируещего электрода, с последующим началом процесса ионизации. В это время с помощью осциллографа фиксировались показатели параметра частоты электроимпульса. Последующая ионизация газа приводила к выпадению тяжёлых частиц на внутреннюю поверхность глушителя и очищенный газ выходил внаружу через выпускное отверстие. Общее время воздействия электрического импульса составило 60 секунд, после которого были получены показатели дымности газа. Процесс проведения экспериментальных исследований на полноразмерном стенде представлены в рисунках 2.28-2.30.



Рисунок 2.28 – Процесс подачи отработавшего газа в глушитель для получения показателей дымности газа до воздействия электроимпульсом



Рисунок 2.29 – Процесс установки расстояния между электродами с последующей подачей отработавшего газа в глушитель для получения показателей дымности газа с воздействием электроимпульса



Рисунок 2.30 – Процесс фиксирования результатов эксперимента

Полученные предварительные результаты экспериментальных исследований по показателям дымности газа приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Результаты экспериментальных исследований на полноразмерном стенде

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Число оборотов коленчатого вала двигателя, (об/мин) | 750 | | 950 | | 1280 | |
| Воздействие электроимпульса | Без | С | Без | С | Без | С |
| Дымность газа, (%) | 50 | 45 | 40 | 34 | 39 | 29 |
| Расстояние между электродами, (м) |  | 0,01 |  | 0,008 |  | 0,006 |
| Частота электроимпульса, (Гц) |  | 10 |  | 12 |  | 14 |

Результаты экспериментальных исследований показывают эффективность воздействия электроимпульса на поток газа согласно полученным показателям дымности, в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя и с учетом текущих показателей частоты электроимпульса и установленных значений расстояния между электродами. Однако результаты экспериментальных исследований требуют тчательного анализа.

2.10 Анализ полученных результатов экспериментальных исследований на полноразмерном стенде

На основе полученных результатов экспериментальных исследований был построен график изменения показателя дымности газа без воздействия и с воздействием на него электроимпульсом (рисунок 2.31).

Рисунок 2.31 – Показатели дымности газа в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя

Согласно полученному графику наблюдается снижение показателей дымности газа после воздействия на него электроимпульсом. Показатели дымности газа без воздействия электроимпульсом составило около 40-50%, а после воздействия на него электроимпульсом его показатели снизились до 29%.

На основе полученных значений дымности были определены их соотношение а именно показатели критерия оптимальности работы полноразмерного стенда электроимпульсного глушителя. Результаты расчетов соотношения дымностей газа (критерия оптимальности) представлены в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Результаты расчетов соотношения дымностей газа

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Число оборотов коленчатого вала двигателя, (об/мин) | 750 | | 950 | | 1280 | |
| Воздействие электроимпульса | Без | С | Без | С | Без | С | |
| Дымность газа, (%) | 50 | 45 | 40 | 34 | 39 | 29 | |
| Показатели критерия оптимальности  (Соотношение дымностей), D2/D1 | 0,9 | | 0,85 | | 0,74 | |

По полученным расчетным показателям соотношений дымности газа (критерия оптимальности) был составлен график зависимости их значений от числа оборотов коленчатого вала двигателя (рисунок 2.32).

Рисунок 2.32 – Показатели критерия оптимальности в зависимости

от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя

Из графика на рисунке 2.32 следует, что у показателей критерия оптимальности наблюдается тенденция к уменьшению по мере увеличения числа оборотов коленчатого вала двигателя. Полученные показатели объясняются тем, что после воздействия на газ электроимпульсом за счет правильного установленного расстояния между электродами на каждом значенмии числа оборотов двигателя степень светопоглощения газа вредными частицами уменьшается. Это в свою очередь приводит к увеличению степени очистки газа от вредных частиц. Представленные показатели соотношения дымности газа удовлетворяют условию критерия оптимальности, значение которого должно стремится к минимуму, что свидетельствует о повышении качества очистки газа и о увеличении эффективности работы электроимпульсного глушителя. В итоге как следует из графика после воздействия на газ электроимпульсом степень очистки газа была увеличена примерно на 30%.

На рисунке 2.33 представлен график изменения показателя критерия оптимальности в зависимости от совместного влияния параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса.

Рисунок 2.33 – Изменение показателей критерия оптимальности в зависимости

от влияния параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса

Согласно представленному графику, отмечается, что показатели критерия оптимальности снижаются при уменьшении расстояния между электродами и увеличении частоты электроимпульсов. Это явление объясняется в разделе 2.1, где отмечено, что с увеличением оборотов коленчатого вала двигателя необходимо уменьшать расстояние между электродами и увеличивать частоту электроимпульсов для формирования и поддержания коронного разряда. Однако важно, чтобы расстояние между электродами оставалось в оптимальных пределах для предотвращения перехода коронного разряда в искровой разряд.

С целью определения оптимальных значений расстояния между электродами и частоты электроимпульса для полноразмерного стенда была применена ранее разработанная методика расчета показателей и . Результаты проведенных расчетов показателей k1 и k2 представлены в таблицах 2.18 и 2.19

Таблица 2.18 – Данные для определения параметра k1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Расстояние между электродами (м)** | 0,01 | 0,0078 | 0,006 |
| **Частота электроимпульса**  **(Гц)** | 10 | 12 | 14 |
| **Параметр k1,**  **∆‧ƒ (м/с)** | 0,1 | 0,0936 | 0,084 |

Таблица 2.19 – Данные для определения параметра k2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Расстояние между электродами (м)** | 0,01 | 0,0078 | 0,006 |
| **Частота электроимпульса**  **(Гц)** | 10 | 12 | 14 |
| **Параметр k2,**  **∆/ƒ (м‧с)** | 0,001 | 0,00065 | 0,000428 |

Затем по полученным значениям параметров k1 и k2 был проведен регрессионно-корреляционный анализ экспериментальных значений показателей критерия оптимальности (соотношения дымностей). Результаты проведенного регрессионно-корреляционного анализа представлены в таблицах 2.20-2.21.

Таблица 2.20 – Результаты аппроксимации функции показателей критерия оптимальности от параметра

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вид регресии | Уравнение регрессии | Коэффи-циент корреля-ции | Коэффи-циент детер-минации | Средняя ошибка аппрок-симации, % |
| Линейная |  | 0,96 | 0,93 | 1,9 |
| Квадратическая |  | 1 | 1 | 0 |
| Степенная |  | 0,96 | 0,93 | 1,9 |
| Показательная |  | 0,97 | 0,94 | 1,73 |
| Логарифмическая |  | 0,96 | 0,92 | 2,1 |
| Гиперболическая |  | 0,95 | 0,91 | 2,2 |
| Экспоненциальная |  | 0,97 | 0,94 | 1,73 |

Таблица 2.21– Результаты аппроксимации функции критерия оптимальности от параметра

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вид регресии | Уравнение регрессии | Коэффи-циент корреля-ции | Коэффи-циент детер-минации | Средняя ошибка аппрок-симации, % |
| Линейная |  | 0,98 | 0,99 | 0,11 |
| Квадратическая |  | 1 | 1 | 0 |
| Степенная |  | 0,99 | 0,98 | 0,82 |

Продолжение таблицы 2.21

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вид регресии | Уравнение регрессии | Коэффи-циент корреля-ции | Коэффи-циент детер-минации | Средняя ошибка аппрок-симации, % |
| Показательная |  | 0,99 | 0,99 | 0,08 |
| Логарифмическая |  | 0,99 | 0,98 | 1,03 |
| Гиперболическая |  | 0,96 | 0,93 | 1,91 |
| Экспоненциаль-ная |  | 0,99 | 0,99 | 0,08 |

Из анализа таблиц 2.20 и 2.21 видно, что наиболее подходящим вариантом для описания зависимости изменения показателей критерия оптимальностиот параметров *k*1 и *k*2 является квадратическое уравнение регрессии. Это подтверждается высокими значениями коэффициентов корреляции и детерминации, а также низкими значениями средней ошибки аппроксимации.

, (2.79)

. (2.80)

Экспериментальные и эмпирические значения показателей дымности газа от параметров k1 и k2 приведены в таблицах 2.22 и 2.23.

Таблица 2.22 – Показатели дымности от к1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр к1, ∆‧ƒ (м/с) | 0,1 | 0,0936 | 0,084 |
| Показатели критерия оптимальности, D2/D1  (экспериментальные значения) | 0,9 | 0,85 | 0,74 |
| Показатели критерия оптимальности, D2/D1  (по уравнению регрессии) | 0,900025 | 0,800025 | 0,7400025 |

Таблица 2.23 – Показатели дымности от к2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр к2,∆/ƒ (м‧с) | 0,001 | 0,00065 | 0,000428 |
| Показатели критерия оптимальности, D2/D1  (экспериментальные значения) | 0,9 | 0,85 | 0,74 |
| Показатели критерия оптимальности, D2/D1  (по уравнению регрессии) | 0,93 | 0,82 | 0,73 |

На основе полученных данных построены графики зависимостей параметров k1 и k2 от показателей критерия оптимальности (рисунки 2.34-2.35).

Рисунок 2.34 – График зависимости сравнения экспериментальных и   
теоериических кривых (по уравнению регрессии) по параметру к1

Рисунок 2.35 – График зависимости сравнения экспериментальных и теоериических кривых (по уравнению регрессии) по параметру к2

Как следует из графиков минимальное значение критерия оптимальности (дымности) достигается при значениях =0,084 и =

Составлена система двух линейных уравнений:

, (2.81)

решение которого, позволило получить оптимальное значение параметров расстояния и частоты для полноразмерного стенда:

и .

Таким образом результаты регрессионно-корреляционного анализа с совместным сравнением показателей k1 и k2 в системе уравнений позволило определить оптимальный режим работы подноразмерного стенда электроимпульсного глушителя, посредством определения оптимальных значений параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса при которых достигается наименьшие значения показателей критерия оптимальности.

Выводы по второму разделу

- изучен процесс очистки газа в электроимпульсном глушителе. Определены ключевые параметры, влияющие эффективность коронного разряда: напряжение, расстояние между электродами, давление газа, температура, форма электродов и частота импульса. Эти параметры взависимости от возможности регулирования их значениями в процессе работы электроимпульсного глушителя были распределены на регулируемые и не регулируемые. К регулируемым параметрам были отнесены такие параметры как расстояние между электродами, частота электроимпульса и форма электродов;

- предложена уникальная конструкция спиралевидных электродов для повышения эффективности воздействия коронного разряда на газовый поток;

- выбран критерий оптимальности работы электроимпульсного глушителя – соотношение дымности газа после и до воздействия электроимпульса, обосновано его использование для оценки эффективности очистки газа;

- установлены основные параметры, определяющие режим работы и конструктивные характеристики электроимпульсного глушителя. Получены критерии подобия, позволяющие разработать методику расчета конструкции и оценить эффективность работы электроимпульсного глушителя;

- разработаны лабораторный стенд электроимпульсной очистки газов и полноразмерный стенд электроимпульсного глушителя. Составлены план и методика проведения экспериментальных исследований;

- проведены экспериментальные исследования на лабораторном стенде. Получены значения освещенности газа. По этим показателям были рассчитаны показатели коэффициента прозрачности газа. На основе взаимосвязи коэффициента прозрачности с коэффициентом светопоглощения и дымности газа была разработана методика расчета соотношения показателей дымности газа;

- результаты экспериментальных исследований на лабораторном стенде электроимпульсной очистки газов подтвердили возможность изменения показателей критерия оптимальности от регулирования параметрами расстояния между электродами и частоты электроимпульса. При регулировании этими параметрами показатели критерия оптимальности снизились до 0,6, а степень очистки газа повысилась примерно до 40%;

- разработана методика расчета оптимальных значений регулируемых параметров. На основе этой методики проведен регрессионно-корреляционный анализ экспериментальных значений критерия оптимальности от зависимости параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса. В результате проведенного анализа была составлена система линейных уравнений и установлена зона оптимального режима работы лабораторного стенда, при котором оптимальные значения параметров расстояния между электродами и частоты электроимпульса составляют: и ;

- результаты экспериментальных исследований на полноразмерном стенде электроимпульсного глушителя подтвердили эффективность воздействия электроимпульса на выхлопной газ. После воздействия на газ электроимпульсом показатели дымности газа снизилась до 29%. А максимальная степень очистки газа после электроимпульсного воздействия составила около 30% согласно полученным значениям показателей критерия оптимальности;

- на основе ранее разработанной методики расчета оптимальных значений регулируемых параметров были определены числовые значения частоты электроимпульса и расстояния между электродами для полноразмерного стенда электроимпульсного глушителя, при которых показатели дымности газа будут минимальными: ∆ ≈ 0,006 м и f ≈ 14 Гц.

3. Теоретическое и экспериментальное исследования процесса очистки выхлопных газов в ультразвуковом глушителе

3.1 Исследование процесса очистки выхлопных газов в ультразвуковом глушителе

Ультразвуковый глушитель для очистки выхлопных газов использует эффект ультразвукового излучения для удаления загрязнений из газового потока. Работает он следующим образом: газы сначала поступают в корпус глушителя через впускное отверстие. Затем ультразвуковой излучатель создает волны, которые помогают осаждать тяжелые частицы газа на дне корпуса. После осаждения, уже очищенные газы выходят наружу, как показано на рисунке 3.1.

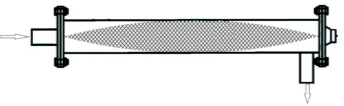


Рисунок 3.1 – Принцип прохождения потока отработавших газов через ультразвуковой глушитель

Под воздействием ультразвука газ начинает процесс коагуляции, который происходит в два этапа. На первом этапе частицы газа подвергаются вибрациям, вызывающим их хаотическое движение и слипание, что приводит к увеличению их размеров. На второй стадии происходит ортокинетическая коагуляция: мелкие частицы продолжают подвергаться ультразвуковым волнам, в то время как большие частицы уже не реагируют на них. При повышении частоты ультразвука ортокинетическая коагуляция переходит в гидродинамическую, где частицы газа взаимодействуют друг с другом за счет трения, описанного в уравнениях Бьеркнеса. [165, 166].

После завершения действия ультразвукового поля, процесс коагуляции в частицах не прекращается, однако его темп заметно снижается. В конечном итоге, частицы постепенно опускаются вниз и оседают на дне глушителя (рисунок 3.2) [167].

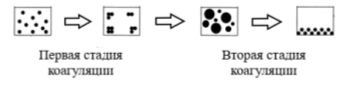


Рисунок 3.2 – Стадии прохождения процесса коагуляции

Процесс воздействия ультразвука в замкнутом объеме глушителя разделяется на три временных интервала. На начальном этапе ультразвук приводит к хаотическому движению частиц газа, но сам процесс коагуляции проходит очень медленно. Затем следует период, в котором эффективность коагуляции резко возрастает из-за смещения частиц к стенкам трубы, создавая области с повышенной концентрацией частиц. Наконец, в третьем интервале происходит уменьшение эффективности коагуляции из-за укрупнения частиц и снижения их общей концентрации в объеме трубы.

Эффективность ультразвуковой коагуляции зависит от множества параметров. В зависимости от возможности их регулирования в процессе работы ультразвукового глушителя, они условны были распределены на регулируемые и регулируемые (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Параметры влияющие на эффективность процесса ультразвуковой коагуляции

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Регулируемые параметры | | Нерегулируемые параметры | |
| Название параметра | Влияние на процесс коагуляции (cg) | Название параметра | Влияние на процесс коагуляции (cg) |
| Частота ультразвука  (*f*)~cg | чем выше частота ультразвука (эффективнее укрупняются частицы малого размера), тем выше эффективность коагуляции. | Интенсивность ультразвука  (*I*)~cg | чем выше интенсивность ультразвука, тем выше эффективность коагуляции |
| Длительность воздействия ультразвука  (*t*)~cg | Чем длительнее воздействие ультразвука, тем выше эффективность коагуляции. | Давление  звуковых волн  (*P*)~cg | чем выше уровень звукового давления, тем выше эффективность коагуляции. |
| Плотность энергии ультразвука  (*p*)~cg | чем выше плотность энергии (количество энергии, передаваемой на единицу площади воздействия), тем выше эффективность коагуляции. |
| Концентрация дисперсных частиц  (*n*)~cg | чем больше концентрация, тем выше эффективность коагуляции |
| Температура газа  (*T*)~cg | чем выше температура газа (интенсивнее столкновения между частицами), тем выше эффективность коагуляции [168-169]. |

Регулирование этими параметрами позволяет оптимизировать процесс ультразвуковой коагуляции для достижения оптимальных результатов.

Следует отметить, что для частиц разных размеров соответствует своя частота, при которой они начинают колебательные движения. Нахождение частицы в колебательном состоянии также зависит от его радиуса и вязкости среды. Взаимосвязь этих параметров представлена в соотношении двух амплитуд колебаний частиц и газа [171]:

,(3.1)

где 𝑈ч , 𝑈г –амплитуды колебаний частицы и газа;

𝑟 – радиус частицы;

𝑓 – частота ультразвуковых волн;

𝜌 – плотность частицы;

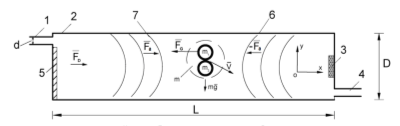
𝜇 – динамическая вязкость.

Соотношение амплитуд основано на законе Стокса, которое является условием гидродинамической коагуляции. А соотношение параметров радиуса частицы, плотности газа, динамической вязкости газа и частоты ультразвуковых волн позволяет определить степень участия частиц в колебании:

.(3.2)

Отсюда следует, чем выше частота ультразвуковых волн, тем больше частицы участвуют в колебаниях, это в свою очередь, приводит к интенсификации процесса коагуляции и увеличению эффективности очистки газа [172].

На процесс коагуляции в ультразвуковом глушителе влияют различные силы, которые были отражены в математической модели диссертационной работы Сарсембекова Б.К. (рисунок 3.3). Эти силы включают в себя силу тяжести *mg*, силу ультразвукового давления, *Fa*, силу давления от двигателя *FD* и силу трения между частицами FG (сила Бьеркнеса).



1 – впускной патрубок выхлопных газов; 2 – корпус глушителя; 3 – ультразвуковой излучатель; 4 – выпускной патрубок; 5 – отражатель волн; 6 и 7 – соответственно прямая и отраженная волна; L и D – длина и высота глушителя; d – диаметр впускного и выпускного патрубка.

Рисунок 3.3 – Схема сил, действующих на коагулируемые частицы газа

Сила ультразвукового давления *Fa* зависит от радиуса частицы, плотности газа, частоты и амплитуды ультразвука. Сила давления *FD* изменяется в зависимости скорости частиц газа. Величина силы трения (гидродинамического сопротивления) *FG* зависит от скорости и динамической вязкости μ газа.

Исходя из анализа воздействующих сил, было сформулировано уравнение движения частицы газа.

*m,* (3.3)

Также в рамках решения этого уравнения была получена зависимость, определяющая скорость газа в глушителе. При увеличении силы давления от двигателя увеличивается скорость газа и повышается сила сопротивления. Однако сила сопротивления припятствует прохождению газа внутри глушителя.

, (3.4)

где

*P* - давление во входе в глушитель;

*d* – диаметр впускного патрубка;

– радиус частицы;

– диаметр глушителя;

- динамическая вязкость [128, c.39].

Приравняв формулы (3.2) и (3.4) по равенству динамической вязкости:

,(3.5)

определена зависимость частоты колебаний от параметров:

(3.6)

Отсюда следует, что частота ультразвукового воздействия обратно пропорциональна размеру частиц. Следовательно чем выше значения частоты ультразвукового колебания, тем больше имеет ее влияние на частицы с малыми размерами. Также известно, что при высоких значениях частоты ультразвука эффективно слипаются мелкие частицы, а при низких частотах слипаются крупные частицы газа. Этот факт обуславливает необходимость определения оптимального ультразвукового диапазона частот для эффективной коагуляции разного размера частиц выхлопного газа внутри глушителя [173].

Согласно исследованию, проведенному в диссертационной работе Шалуновой К.В., наилучшая эффективность коагуляции частиц достигается при увеличении частоты начиная с 19 кГц. Это приводит к увеличению интвенсивности ультразвуковой коагуляции на 20% [174]. Также влияние акустического воздействия на поток газа с частотой ниже 19 кГц при высоком звуковом давлении является опасным для человека и требует дополнительной звукоизоляции. В связи с этим, для повышения эффективности коагуляции рекомендуется использовать частоту не менее 19 кГц [175].

В условиях когда частицы имеют разные размеры, эффективная коагуляция мелких частиц требует выбора излучателя с высокой частотой излучения. Существует несколько конструкций излучателей, которые генерируют ультразвуковые колебания в газе с целью усиления процесса коагуляции [176]. На рисунке 3.4 показана классификация типов излучателей.

Рисунок 3.4— Классификация ультразвуковых излучателей

Аэродинамические излучатели ультразвуковой частоты, такие как вращающиеся сирены, используют прерывание потока сжатого воздуха для создания звуковых колебаний. Они состоят из статора и ротора с отверстиями, через которые проходит воздух. Этот процесс создает звуковые волны ультразвуковой частоты (рисунок 3.5) [177].



Рисунок 3.5 - Внешний вид ультразвуковой сирены

Существуют две основные разновидности динамических сирен - аксиальные и радиальные. Они имеют различия в расположении осей отверстий. Их преимущества: компактность и простота изготовления, но они также имеют недостатки: высокое потребление сжатого воздуха, низкий коэффициент полезного действия (до 20%) и склонность к износу. Эти ограничения снижают их распространенность, хотя они широко используются в промышленности. [178].

Для создания ультразвуковых колебаний в воздухе также используются электромеханические преобразователи. Они преобразуют электрическую энергию в механические колебания твердого тела, которые затем переходят в акустическую энергию. Эти преобразователи подразделяются на разные типы, такие как электромагнитные, электродинамические, электростатические, магнитострикционные и пьезоэлектрические [179].

Электромагнитные преобразователи создают колебания подвижной механической системы под воздействием переменного электромагнитного поля. Электродинамические преобразователи генерируют колебания через взаимодействие магнитного поля неподвижного магнита и катушки с током. Электростатические преобразователи создают акустические колебания при взаимодействии мембраны с электрическим полем, созданным статором [180].

Хотя электродинамические и электростатические преобразователи широко используются в обычных акустических системах, их применение в ультразвуковой технике ограничено из-за уменьшения интенсивности воздействия ультразвука с увеличением его частоты. То же самое относится и к электромагнитным преобразователям [181].

Магнитострикционные излучатели используются для возбуждения колебаний в материалах с магнитострикцией в переменном магнитном поле. (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Магнитострикционные излучатели

Их низкий коэффициент полезного действия (40%) вызывает увеличение шума. Также они ограничены низкой частотой генерируемых колебаний и трудностью поддержания стабильной частоты из-за малых размеров стержня. Также возникает нагрев излучателя, требующий охлаждения [182].

Пьезоэлектрические излучатели ультразвука широко используются в промышленности благодаря своей относительно низкой стоимости и легкости изготовления из искусственных пьезокерамических материалов. Эти излучатели имеют различные формы, размеры и типы.

Пьезоэлектрический излучатель представляет собой электромеханический преобразователь, использующий элемент с пьезоэлектрическими свойствами, способными изменять размеры под воздействием электрического поля (обратный пьезоэффект). Они применяются в ультразвуковом диапазоне частот до 310 МГц [183].

Пьезоэлектрические излучатели генерируют колебания, изменяя размеры элемента под воздействием электрического поля. В отличие от магнитострикционных излучателей с КПД 30-35%, у пьезоэлектрических излучателей коэффициент полезного действия в электроакустическом отношении выше, составляет примерно 55-60%. [184].

Учитывая недостатки других типов преобразователей, пьезоэлектрические излучатели являются предпочтительным выбором для ультразвуковых глушителей.

Таким образом для определения оптимального режима работы ультразвукового глушителя необходимо варьировать значениями частоты ультразвука, так как значение частоты оказывает непосредсвенное влияние на частицы газа разного размера, а также способоствуют к эффективному прохождению процесса коагуляции между частицами, что в последствии приводит к качественной очистки газа внутри глушителя. Для последующих исследований с влиянием ультразвука на степень очистки газа предлагается применять пьезоэлектрические излучатели с частотой не менее 19 кГц.

3.2 Установление критерия оптимальности и параметров режима работы ультразвукового глушителя

С целью установления оптимального режима работы ультразвукового глушителя, при которых степень очистки отработавшего газа будет высокой, а процесс коагуляции будет происходить наиболее интенсивно, необходимо установить критерий оптимальности его работы.

Критерием оптимальности работы ультразвукового глушителя как и в электроимпульсном глушителе является соотношение показателей дымности газа после и до воздействия ультразвука. В свою очередь, оптимальное соотношение показателей дымности газа будет установлено от регулирования параметром частоты воздействия ультразвука и изменением угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя. Следовательно схема оптимизации работы ультразвукового глушителя будет иметь следующий вид (рисунок 3.7):

Рисунок 3.7 – Схема оптимизации работы ультразвукового глушителя:

при *f/ω=const*; *D2/D1→min*

Работа ультразвукового глушителя также зависит от различных параметров (переменных), таких как число оборотов двигателя, частота ультразвука, угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя, геометрические показатели глушителя, динамическая вязкость газа, скорость частицы газа и многих других. Однако работу ультразвукового глушителя как и электроимпульсного глушителя невозможно описать детеминированной функцией, ввиду влиянием на него большого количества факторов. Следовательно в этом случае также необходимо применить метод теории подобия и анализ размерностей. Полученные этим методом критерии подобия, не только характеризуют оптимальность работы глушителя, а также являются основой для его методики расчета конструкции.

На основе рассмотренных литературных источников были установлены все параметры, влияющие на работу ультразвукового глушителя: число оборотов коленчатого вала двигателя (, частота ультразвука (, плотность газа (), диаметр корпуса ультразвукового глушителя , динамическая вязкость газа (), скорость частицы газа (), длина корпуса глушителя (*L*), объем (емкость) камеры сгорания двигателя (Q), масса сажи (, масса газа (, показатели дымности газа до (*D*1) и после (*D*2) воздействия на него ультразвуком.

На основе рассмотренных параметров было составлено уравнение зависимости от параметра дымности газа после воздействия ультразвука. Функциональное соотношение параметров от параметра дымности газа, после воздействия ультразвука *D*2 представлено в следующем виде:

(3.7)

Затем это уравнение было представлено в следующем виде:

(3.8)

Все переменные составленного уравнения были преобразованы в однородный вид относительно размерностей согласно четырем основным физических величинам: длины , массы , времени и силы света *J*v (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Формулы размерностей параметров

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Название  параметров | Обозначение | Единица измерения | Формула размерности |
| 1 | Число оборотов коленчатого вала двигателя |  | c-1 | *T-1* |
| 2 | Частота ультразвука |  | c-1 | *T-1* |
| 3 | Плотность газа |  | кг/м3 | *ML-3* |
| 4 | Диаметр корпуса ультразвукового глушителя |  | м | *L* |
| 5 | Динамическая вязкость газа |  | Пас | *ML-1 T-1* |
| 6 | Скорость частицы газа |  | м/с | *ML-1* |
| 7 | Длина глушителя |  | м |  |
| 8 | Объем камеры сгорания двигателя |  | м3 | *L-3* |
| 9 | Сила света | *J*v | кд | *J* |
| 10 | Масса сажи |  | кг | *M* |
| 11 | Масса газа |  | кг | *M* |
| 12 | Дымность газа до воздействия ультразвуком | *D*1 | лк | *JL-2* |
| 13 | Дымность газа после воздействия ультразвуком | *D*2 | лк | *JL-2* |

Согласно полученному уравнению (3.8) число параметров равно , а число основных единиц измерения равно . В соответствии с теоремой π, число основных критериев подобия будет равно: . Следовательно после решения составленного уравнения (3.8) необходимо получить 8 критериев подобия. Для получения этих критериев было составлено следующее уравнение:

(3.9)

Это уравнение было преобразовано в следующий вид:

(3.10)

где – обозначение каждого критерия подобия.

Из уравнения 3.8, выбраны четыре переменных с независимыми размерностями: диаметр корпуса глушителя, скорость частицы газа (), плотность газа () и сила света ( *J*v).

Затем составлено персональное уравнение для 8 критериев подобия ,. Выбранные четыре независимых переменных () включены в каждое уравнение критерия π. Остальные переменные, а именно: по одному вошли в состав уравнения критериев π. Поскольку показатели степени четырех основных переменных неизвестны, они были обозначены следующими символами в уравнениях: . А показатели степени остальных переменных приняты равным -1. Тогда персональные уравнение для 8 критериев подобия представлены в следующем виде:

, (3.11)

, (3.12)

, (3.13)

, (3.14)

, (3.15)

, (3.16)

, (3.17)

. (3.18)

В ходе решения этих уравнений вместо переменных были подставлены их формулы размерности. Такое преобразование переменных позволило определить их показатели степеней, которые в свою очередь позволили в правильном соотношении составить критерии подобия.

Представлена методика расчета первого критерия подобия :

, (3.19)

Показатели степени с одинаковыми размерностями были сложены в один ряд:

*.* (3.20)

Затем из совокупности показателей степеней была составлена система уравнений. Для того чтобы составляемый критерий подобия и соотношение параметров было равно единице, соскупность их показателей равно нулю:

, (3.21)

Решение этой системы позволило определить значения неизвестных величин: .

Подставляя полученные значения показателей степеней обратно в уравнение (3.11) в итоге был получен первый критерий подобия:

. (3.22)

Был проведен аналогичный расчет остальных 7 уравнений, определяющие критерии подобия.

Проведен расчет для второго критерия подобия:

, (3.23)

*.* (3.24)

, (3.25)

Отсюда: .

Получен второй критерий подобия:

. (3.26)

Проведен расчет для третьего критерия подобия:

, (3.27)

.(3.28)

, (3.29)

Отсюда: .

Получен третий критерий подобия:

. (3.30)

Проведен расчет для четвертого критерия подобия:

, (3.31)

.(3.32)

, (3.33)

Отсюда: .

Получен четвертый критерий подобия:

. (3.34)

Проведен расчет для пятого критерия подобия:

, (3.35)

.(3.36)

, (3.37)

Отсюда: .

Получен пятый критерий подобия:

. (3.38)

Проведен расчет для шестого критерия подобия:

, (3.39)

.(3.40)

, (3.41)

Отсюда: .

Получен шестой критерий подобия:

. (3.42)

Проведен расчет для седьмого критерия подобия:

, (3.43)

.(3.44)

, (3.45)

Отсюда: .

Получен седьмой критерий подобия:

. (3.46)

Проведен расчет для восьмого критерия подобия:

, (3.47)

.(3.48)

, (3.49)

Отсюда: .

Получен восьмой критерий подобия:

. (3.50)

В итоге были получены 8 критериев подобия из составленного ранее уравнения (3.9):

,(3.51)

Полученное число критериев подобия соответствует теореме π. Это означает, что уравнение было составлено верно, а полученные критерии подобия позволяют оценить работу ультразвукового глушителя.

Далее уравнение (3.50) было преобразовано таким образом, что критерий был перемещен на другую сторону уравнения.

. (3.52)

Учитывая пропорциональность между параметрами , третий критерий был изменен на критерий Рейнольдса *Re*.

, (3.53)

Число полученных критериев подобия слишком велико. Дабы не усложнять дальнейшие расчеты, их число было сокращено посредством взаимного соотношения или произведения их друг на друга.

Между собой объединены четвертый и пятый критерии. В итоге получен следующий критерий:

, (3.54)

Далее между собой сокращены шестой и седьмой критерий:

, (3.55)

Полученный критерий (3.55) соответствует коэффициенту коагуляции, представленный в диссертационной работе Сарсембекова Б.К [128, c 47]. В этой диссертационной работе cчитается, что коэффициент коагуляции равен отношению массы сажи к общей массе газа:

. (3.56)

где – коэффициент коагуляции.

Затем сокращая оставшиеся первый и второй критерии подобия между собой был получен следующий критерий:

, (3.57)

Преобразовав полученный критерий по отношению к угловой скорости коленчатого вала двигателя был получен следующий критерий:

, (3.58)

Далее этот критерий (3.58) был объединен с критерием (3.54) с целью создания единого критерия, позволяющего определить основные параметры конструкции и режима работы ультразвукового глушителя:

, (3.59)

После всех преобразований в итоге были получены следующие критерии подобия, зависящие от соотношения дымности газа после и до воздействия ультразвуком:

. (3.60)

Таким образом на основе примененного метода теории подобия и анализа размерностей были получены четыре критериев подобия:

, (3.61)

, (3.62)

, (3.63)

, (3.64)

Полученные критерии подобия позволяют описать процесс работы ультразвукового глушителя. Критерий позволяет определить основные параметры конструкции и режима работы ультразвукового глушителя. Критерий описывает режим прохождения газа внутри глушителя, а именно его переход от ламинарного режима к турбулентному. Критерий характеризует степень осаждения твердых частиц газа на дне глушителя после воздействия на него ультразвуком. Показатели этого критерия также соответствуют коэффициенту коагуляции и позволяет оценить эффективность прохождения процесса коагуляции в ультразвуковом глушителе. Критерий принят нами за критерий оптимальности работы ультразвукового глушителя.

3.3 Цель и задачи экспериментальных исследований на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя

Для определения оптимального режима работы ультразвукового глушителя на основе установленного критерия оптимальности (), были проведены экспериментальные исследования по измерению показателей дымности газов до ( и после () воздействия ультразвука.

Ранее похожие экспериментальные исследования по определению показателей дымности газа были проведены и представлены в научной статье (Ultrasonic unit for reducing the toxicity of diesel vehicle exhaust gases, Journal of Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 2022 [11, c.193]. Эти результаты экспериментальных исследований включают в себя опыты по определению показателей мутности (дымности) газа в металлическом полноразмерном стенде глушителя. Показатели дымности газа определялись до и после воздействия на газ ультразвуком. В проведенных экспериментальных исследованиях эти показатели были получены в зависимости от числа оборотов коленчатого вала двигателя (*n*). (рисунок 3.8).

Рисунок 3.8 – Показатели дымности (мутности) газа в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя

Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают положительное воздействие ультразвука на снижение показателей дымности газа. Числовые значения показателей дымности газа после воздействия на него ультразвуком оказались меньше, чем у показателей дымности газа, не подвергавшиеся воздействию со стороны ультразвука. В целом благодаря ультразвуковому воздействию показатели дымности газа снизились примерно на 15-20%.

Однако в проведенных экспериментальных исследованиях не было учтено влияние частоты ультразвука (*f*) на показатели дымности газа. Как известно, частота ультразвука оказывает непосредственное воздействие на скорость образования и на продолжительность прохождения процесса коагуляции между частицами газа. Также ранее было отмечено что, частицы разного размера коагулируют на разной частоте, мелкие частицы подвергаются процессу коагуляции при высоких частотах, а крупные частицы напротив на малых частотах. Следовательно для того, чтобы частицы разного размера наиболее активно участвовали в процессе коагуляции необходимо установить при каких значениях частоты ультразвука обеспечивается наиболее низкие показатели дымности газа и достигается наилучшая степень его очистки.

С учетом выше отмеченного были проведены экспериментальные иссследования по определению показателей дымности газа ( и () в зависимости от регулирования значениями частоты ультразвукового излучателя (*f* ) и с учетом изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя (*n*). Также дополнительными экспериментальными исследованиями было выявлено оптимальное расстояние ( осаждения частиц газа внутри глушителя. Этот параметр определен по показателям массы осажденных частиц газа ( до и после воздействия ультразвука с учетом установленного оптимального значения частоты ультразвука ( (по результатам основных экспериментальных исследований) и в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя (*n*).

Целью проведенных экспериментальных исследований являлось установление оптимального режима работы полноразмерного стенда ультразвукового глушителя посредством определения показателей дымности газа до и после воздействия ультразвуком в зависимости от регулирования параметрами частоты ультразвука и числа оборотов двигателя.

Структура проведения экспериментальных исследований представлена на рисунке 3.9.

Рисунок 3.9 – Структура проведения экспериментальных исследований

Для достижения поставленной цели были выдвинуты следующие задачи эксперимента:

- разработка экспериментального стенда, подбор оборудования и измерительной аппаратуры, обеспечивающих необходимые условия для проведения экспериментальгых исследований и определения значений рассматриваемых показателей;

- разработка плана и методики проведения экспериментальных исследований;

- определение необходимого числа опытов для проведения экспериментальных исследований;

- получение и обработка экспериментальных данных.

3.4 Оборудование и измерительная аппаратура полноразмерного стенда ультразвукового глушителя

Для проведения экспериментальных исследований нами был использован полноразмерный стенд ультразвукового глушителя, разработанным в научной лаборатории кафедры «Транспортная техника и логистические системы (рисунок 3.10).

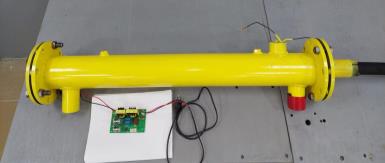
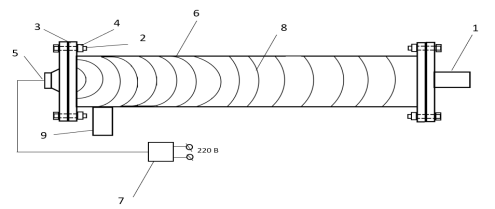


Рисунок 3.10 – Полноразмерный стенд ультразвукового глушителя

Схема полноразмерного стенда глушителя приведена на рисунке 3.11.



1- патрубок входа выхлопных газов, 2- болт, 3- фланец, 4- гайка, 5- ультразвуковой излучатель, 6- корпус установки (стальная труба), 7- ультразвуковой генератор, 8- область воздействия ультразвука, 9- патрубок выхода выхлопных газов.

Рисунок 3.11 – Схема экспериментальной установки ультразвукового глушителя

Стенд состоит из корпуса 6, патрубка входа выхлопных газов 1, ультразвукового излучателя 5, ультразвукового генератора 7 и патрубка выхода выхлопных газов 8.

Воздействие на газ ультразвуком осуществлялось с помощью ультразвукового оборудования, состоящего из ультразвукового генератора и излучателя разной частоты (25, 28 и 40 кГц) (рисунок 3.12). Технические характеристики ультразвукового оборудования представлены в таблице 3.3.



Рисунок 3.12 - Ультразвуковое оборудование

Таблица 3.3 – Технические характеристики ультразвукового оборудования

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Оборудование | Показатели | Значения |
| Ультразвуковой генератор | Частота | 40 кГц |
| Статическая емкость | 4400 - 4610 пФ |
| Излучающая поверхность | 45 мм |
| Сопротивление изоляции | 10000 мОм |
| Мощность | 100 Вт |
| Ультразвуковой излучатель | Частота | 25 кГц  28 кГц  40 кГц |
| Мощность | 100 Вт |

В качестве измерительной аппаратуры показателей дымности был использован дымомер оптический марки BOSCH BEA 070 (рисунок 3.13).

# 

Рисунок 3.13 – Дымомер оптический BEA 070

В дополнительном экспериментальном исследовании для определения массы осаждения частиц был использованы весы «MH-500» (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 –Весы «MH-500»

Разработанный экспериментальный стенд ультразвукового глушителя предоставляет возможность провести на нем соответствующие экспериментальные исследования и определить числовые значения показателей параметров, позволяющие установить оптимальный режим работы ультразвукового глушителя.

3.5 План, методика проведения и предварительные результаты экспериментальных исследований на полноразмерном стенде

Методика основного эксперимента заключалось в определении показателей дымности газа без воздействия и с воздействием ультразвука в зависимости от изменения частоты ультразвука и с учетом изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя. Эксперименты проводились в два этапа: 1 этап – без воздействия на газ ультразвуком, 2 этап – с воздействием на газ ультразвуком. Воздействие на газ ультразвуком осуществлялось посредством установления в корпус глушителя ультразвукового излучателя и с поочередной их заменой на частоту 25 кГц, 28 кГц и 40 кГц. План и порядок проведения основных экспериментальных исследований представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – План и порядок проведения основных экспериментальных исследований

|  |  |
| --- | --- |
| № операции | Проводимые операции |
| **Подготовительный этап** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля и прогреть до рабочей температуры |
| 2 | Произвести подключение полноразмерного стенда к автомобилю |
| 3 | Подсоединить ультразвуковой генератор к глушителю |
| **1 этап. Определение дымности газа при750 об/мин**  **без воздействия и с воздействием ультразвука** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля |
| 2 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 750 об/мин |
| 3 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |

Продолжение таблицы 3.4

|  |  |
| --- | --- |
| 4 | Выключить зажигание ДВС |
| 5 | Установить ультразвуковой излучатель с частотой 25 кГц |
| 6 | Включить ультразвуковой генератор и излучатель в глушителе |
| 7 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 8 | Выключить ультразвуковой генератор |
| 9 | Выключить зажигание ДВС |
| 10 | Записать полученные результаты в журнал эксперимента |
| **2 этап. Определение дымности газа при 950 об/мин**  **без воздействия и с воздействием ультразвука** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля |
| 2 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 950 об/мин |
| 3 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 4 | Выключить зажигание ДВС |
| 5 | Установить ультразвуковой излучатель с частотой в 28 кГц |
| 6 | Включить ультразвуковой генератор и излучатель в глушителе |
| 7 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 8 | Выключить ультразвуковой генератор |
| 9 | Выключить зажигание ДВС |
| 10 | Записать полученные результаты в журнал эксперимента |
| **3 этап. Определение дымности газа при 1250 об/мин**  **без воздействия и с воздействием электриомпульса** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля |
| 2 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 1250 об/мин |
| 3 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 4 | Выключить зажигание ДВС |
| 5 | Установить ультразвуковой излучатель с частотой в 40 кГц |
| 6 | Включить ультразвуковой генератор и излучатель в глушителе |
| 7 | Произвести замеры показателя дымности газа в течении t=60 с |
| 8 | Выключить ультразвуковой генератор |
| 9 | Выключить зажигание ДВС |
| 10 | Записать полученные результаты в журнал эксперимента |

Методами математической статистики расчетным путем предварительно было определено параллельное число опытов для проведения экспериментальных исследований на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя. Результаты расчетов представлены в приложении В.

Основные экспериментальные исследования на стенде проводились следующим образом. Осуществлялся запуск двигателя автомобиля и его прогрев до рабочей температуры. Производилось подключение полноразмерного стенда ультразвукового глушителя к автомобилю. К глушителю подсоединялся ультразвуковой генератор и ультразвуковой излучатель. Подключение стенда к автомобилю осуществлялось через входное отверстие с помощью резинового шланга, подающий отработавшие газы из автомобиля. Нажатием на акселератор задавалось число оборотов коленчатого вала двигателя и подавался газ. Диапозон изменения числа оборотов составило 750, 950 и 1250 об/мин. На каждом значении этих чисел на внутренник корпус стенда глушителя поступал газ и замерялись его показатели дымности с помощью оптического дымомера. Полученные показатели дымности без участия ультразвукового оборудования были записаны в журнал наблюдений. После получения показателей дымности без воздействия ультразвука, на следующем этапе экспериментального ислледования осуществлялось воздействие ультразвука на поток газов с помощью ультразвукового излучателя с определенным значением частоты в 25 кГц. Затем на каждом значении числа оборотов коленчатого вала двигателя и с учетом воздействия частоты ультразвука оптическим дымомера замерялись показатели дымности газа. Общее время воздействия ультразвука составило 60 секунд. Экспериментальные опыты проводились аналогичным образом, но уже с заменой ультразвукового излучателя с показателями частоты на 28 кГц и 40 кГц.

Методика проведения дополнительных экспериментальных исследований на стенде ультразвукового глушителя состояла из двух этапов: определение массы осаживаемых частиц (сажи) без воздействия ультразвуком на первом этапе и с воздействием ультразвука на втором этапе. Эти исследования были проведены при различных значениях числа оборотов коленчатого вала двигателя (950 об/мин и 1250 об/мин), при этом ультразвук воздействовал на газ с установившейся оптимальной частотой 40 кГц. План и порядок проведения дополнительных экспериментальных исследований представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – План и порядок проведения дополнительных экспериментальных исследований

|  |  |
| --- | --- |
| № операции | Проводимые операции |
| **Подготовительный этап** | |
| 1 | Измерить 5 пронумерованных листков бумаги на весах |
| 2 | Разместить листки на внутреннюю поверхность стенда глушителя |
| 3 | Запустить двигатель автомобиля и прогреть до рабочей температуры |
| 4 | Произвести подключение полноразмерного стенда к автомобилю |
| 5 | Подсоединить ультразвуковой генератор к глушителю |
| **1 этап. Определение массы осаживаемой частиц газа при 950 об/мин**  **без воздействия и с воздействием ультразвука** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля |
| 2 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 950 об/мин |
| 3 | Провести поток газа через глушитель в течении t=60 с |
| 4 | Выключить зажигание ДВС |
| 5 | Вытащить листки бумаги из внутренней поверхности глушителя |
| 6 | Произвести замеры массы осаженных частиц газа на листках |
| 7 | Запустить двигатель автомобиля |
| 8 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 950 об/мин |
| 9 | Установить ультразвуковой излучатель с частотой в 40 кГц |
| 10 | Включить ультразвуковой генератор и излучатель в глушителе |
| 11 | Провести поток газа через глушитель в течении t=60 с |
| 12 | Выключить ультразвуковой генератор |
| 13 | Выключить зажигание ДВС |
| 14 | Вытащить листки бумаги из внутренней поверхности глушителя |

Продолжение таблицы 3.5

|  |  |
| --- | --- |
| № операции | Проводимые операции |
| 15 | Произвести замеры массы осаженных частиц газа на листках после воздействия ультразвуком |
| 16 | Выключить ультразвуковой генератор |
| 17 | Выключить зажигание ДВС |
| 18 | Записать все полученные результаты в журнал эксперимента |
| **2 этап. Определение массы осаживаемой частиц газа при 1250 об/мин**  **без воздействия и с воздействием электриомпульса** | |
| 1 | Запустить двигатель автомобиля |
| 2 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 1250 об/мин |
| 3 | Провести поток газа через глушитель в течении t=60 с |
| 4 | Выключить зажигание ДВС |
| 5 | Вытащить листки бумаги из внутренней поверхности глушителя |
| 6 | Произвести замеры массы осаженных частиц газа на листках |
| 7 | Запустить двигатель автомобиля |
| 8 | Установить обороты коленчатого вала ДВС на 1250 об/мин |
| 9 | Установить ультразвуковой излучатель с частотой в 40 кГц |
| 10 | Включить ультразвуковой генератор и излучатель в глушителе |
| 11 | Провести поток газа через глушитель в течении t=60 с |
| 12 | Выключить ультразвуковой генератор |
| 13 | Выключить зажигание ДВС |
| 14 | Вытащить листки бумаги из внутренней поверхности глушителя |
| 15 | Произвести замеры массы осаженных частиц газа на листках после воздействия ультразвуком |
| 16 | Выключить ультразвуковой генератор |
| 17 | Выключить зажигание ДВС |
| 18 | Записать все полученные результаты в журнал эксперимента |

Дополнительные экспериментальные исследования были проведены в следующей последовательности. На внутреннюю поверхность стенда глушителя было размещено пять пронумерованных листов бумаги размером 0,01×0,01 м, общей длиной 0,5 м. Масса бумаги измерялась весами «MH-500» до начала проведения экспериментальных исследований. Затем был запущен двигатель автомобиля, и его температура была повышена до рабочего уровня. Полноразмерный стенд ультразвукового глушителя был подключен к автомобилю. Нажатием акселератора задавалось число оборотов коленчатого вала двигателя, с изменением диапазона оборотов в 950 и 1250 оборотов в минуту. Отработавший выхлопной газ направлялся в полноразмерный стенд ультразвукового глушителя через входной патрубок. Были получены показатели массы осаживаемых частиц без воздействия ультразвука. При включении ультразвукового оборудования (генератора и излучателя) газ подвергался воздействию ультразвуковых волн с частотой 40 кГц. Время воздействия ультразвука составило 5 минут. Внутри глушителя происходила ультразвуковая интенсификация процессов коагуляции и очистки отработавших газов, что способствовало оседанию крупных частиц газа. Очищенный отработавший газ выводился через выходной патрубок. После каждого испытания пронумерованный лист бумаги с осевшими твердыми частицами аккуратно извлекался и вновь взвешивался. По разнице мас, зафиксированных до и после эксперимента было определено значение массы осевших твердых частиц газа.

Полученные результаты основных экспериментальных исследований приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты основных экспериментальных исследований на стенде глушителя

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Число оборотов коленчатого вала двигателя, (об/мин) | 750 | | 950 | | 1250 | |
| Дымность газа,  (%) | | Дымность газа,  (%) | | Дымность газа,  (%) | |
| Воздействие  ультразвука  Частота  электроимпульса | Без | С | Без | С | Без | С |
| 25 000 | 28 | 25 | 45 | 43 | 50 | 47 |
| 28 000 | 40 | 36 | 50 | 46 | 49 | 46 |
| 40 000 | 40 | 35 | 53 | 44 | 54 | 46 |

Результаты дополнительных экспериментальных исследований приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты дополнительных экспериментальных исследований на м стенде глушителя

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Длина осаживания частиц, (м) | Масса осевшей сажи (г) при  950 об/мин (99,5 рад/с) | | Масса осевшей сажи (г) при  1250 об/мин (130,9 рад/с) | |
| Воздействие ультразвука | | Воздействие ультразвука | |
| Без ультразвука | С ультразвуком | Без ультразвука | С ультразвуком |
| 0,1 | 0,11 | 0,1 | 0,72 | 0,87 |
| 0,2 | 0,06 | 0,14 | 0,41 | 0,93 |
| 0,3 | 0,12 | 0,21 | 0,13 | 0,94 |
| 0,4 | 0,23 | 0,32 | 0,64 | 0,98 |
| 0,5 | 0,15 | 0,28 | 0,33 | 0,69 |

Сам процесс проведения экспериментальных исследований представлены на рисунках 3.15-3.17.



Рисунок 3.15 – Процесс подключения полноразмерного стенда к автомобилю



Рисунок 3.16 – Процесс подключения ультразвукового излучателя к глушителю



Рисунок 3.17 – Процесс фиксирования экспериментальных результатов

3.6 Анализ полученных результатов экспериментальных исследований на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя

На основе полученных результатов экспериментальных исследований были построены графики изменения показателей дымности газа без воздействия и с воздействием на него ультразвуком в зависимости от числа оборотов коленчатого вала двигателя и при определенных частотах в 25, 28, и 40 кГц. (рисунки 3.18-3.20).

Рисунок 3.18 – Показатели дымности газа в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя (частота ультразвука 25 кГц)

Рисунок 3.19 – Показатели дымности газа в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя (частота ультразвука 28 кГц)

Рисунок 3.20 – Показатели дымности газа в зависимости от изменения числа оборотов коленчатого вала двигателя (частота ультразвука 40 кГц)

Полученные результаты эксперимента подтверждают, что применение ультразвука положительно влияет на уменьшение показателей дымности газов. Показатели дымности газа после воздействия на него ультразвуком имеет меньшие значения, чем у показателей дымности газа, не подвергавшиеся воздействию со стороны ультразвука. После воздействия на газ ультразвуком показатели дымности максимально снижены до 35 %.

На основе полученных экспериментальных значений дымности были расчитаны их соотношение, а именно отношение дымности газа находившегося под воздействием ультразвука (*D2*) к дымности газа не имевшего воздействия со стороны ультразвука (*D1*). Такое соотношение соответствует критерию оптимальности работы ультразвукового глушителя *K*. Результаты расчетов по определению показателей критерия оптимальности стенда ультразвукового глушителя представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчетов соотношения показателей дымности газа

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Число оборотов коленчатого вала двигателя, (об/мин) | 750 | 950 | 1250 |
| Частота ультразвука (Гц) | Показатели критерия оптимальности (*D2/D1)* | Показатели критерия оптимальности (*D2/D1)* | Показатели критерия оптимальности (*D2/D1)* |
| 25 000 | 0,89 | 0,95 | 0,94 |
| 28 000 | 0,9 | 0,92 | 0,93 |
| 40 000 | 0,87 | 0,83 | 0,85 |

По полученным расчетным показателям критерия оптимальности была составлена диаграмма зависимости их значений от частоты ультразвука (рисунок 3.21).

Рисунок 3.21 – Изменение показателей критерия оптимальности от значений частоты ультразвука (при числе оборотов коленчатого вала двигателя в 750, 950 и 1250 об/мин)

Из диаграммы на рисунке 3.21 следует, что у значений показателя критерия оптимальности (соотношения дымности газа) наблюдается тенденция к уменьшению по мере увеличения частоты ультразвука. К примеру самые наименьшие показатели критерия оптимальности были зафиксированы на самом высоком значении частоты ультразвука в 40 кГц вне зависимости от увеличения числа оборотов коленчатого вала двигателя, а эффективность очистки газа была увеличена примерно на 15-20%.

Полученный результат объясняются тем, что между частотой ультразвука и размерами частиц газа существует обратная связь, более высокие значения частоты ультразвука оказывают влияние на более мелкие частицы газа. Если говорить точнее, при более высоких значениях частоты ультразвука мелкие частицы газа колеблятся с большей интенсивностью и тем самым активно участвуют в процессе коагуляции, что в последствии приводит к более эффективной очистке газа и уменьшению показателей дымности газа. Уменьшение показателей дымности газа свою очередь удовлетворяет условие критерия оптимальности, значение которого должно стремится к минимуму. Таким образом на частоте 40 кГц можно добиться более значимых показателей по уменьшению дымности газа, нежели на 25 и 28 кГц.

Далее была создана диаграмма, иллюстрирующая изменение показателей критерия оптимальности в зависимости от угловой скорости двигателя при различных частотах ультразвука: 25 кГц, 28 кГц и 40 кГц. (рисунок 3.22). Значения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя были преобразованы из значений числа оборотов коленчатого вала двигателя (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Значения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Число оборотов коленчатого вала двигателя, n (об/мин) | 750 | 950 | 1250 |
| Угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя , рад/с | 78,5 | 99,5 | 130,9 |

Рисунок 3.22 – Изменение показателей критерия оптимальности от значений угловой скорости при частоте ультразвука 25 кГц, 28 кГц, 40 кГц

Согласно диаграмме на рисунке 3.22 наблюдается следующая картина: При угловой скорости 78,5 об/мин наименьшие значения критерия оптимальности зафиксированы при частоте ультразвука 40 кГц. Частоты 25 кГц и 28 кГц показывают более высокие и близкие значения.

При угловой скорости 99,5 об/мин значения критерия оптимальности значительно возрастают при частоте 25 кГц, достигнув максимума, тогда как частота 28 кГц показывает немного более низкие значения, а частота 40 кГц остается наименьшей.

При угловой скорости 130,9 об/мин наблюдается снижение значений критерия оптимальности для частоты 40 кГц, в то время как значения для частот 25 кГц и 28 кГц остаются высокими и близкими друг к другу, причем частота 28 кГц продолжает показывать наивысшие значения на каждом этапе.

Таким образом, частота 28 кГц демонстрирует устойчивый рост показателей критерия оптимальности на всех значениях угловой скорости коленчатого вала двигателя, в то время как частота 40 кГц последовательно показывает наименьшие результаты.

Затем для проведения анализа комплексного влияния параметров частоты ультразвука и угловой скорости двигателя на показатели критерия оптимальности был построен следующий трехмерный график (рисунок 3.23).

Рисунок 3.23 – Изменение показателя критерия оптимальности в зависимости от комплексного воздействия параметров *f* и 𝜔

Согласно полученному графику следует, что при комплексном воздействии рассматриваемых параметров наименьшие показатели дымности газа достигаются при частоте ультразвука 40 кГц. Это подтверждается тем, что при этой частоте на разных показателях угловой скорости вращения газа были зафиксированы минимальные значения соотношения дымности газа. Согласно графику, эти значения находятся в диапозанах 0,85-0,9 при угловой скорости 78,5 рад/с и 0,8-0,85 при угловых скоростях 99,5 и 130,9 рад/с, соответственно.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов было выявлено оптимальное значение параметра частоты ультразвука, при котором полноразмерный стенд ультразвукового глушителя работает оптимально. При частоте 40 кГц было достигнуто минимальное значение показателя критерия оптимальности на всех рассмотренных числах оборотов коленчатого вала двигателя. Следовательно, частота ультразвука в 40 кГц следует считать оптимальной (fopt=40 кГц).

Затем были проведены расчеты по определению правильного соотношения между оптимальной частотой ультразвука и угловой скоростью двигателя *fopt*/, с целью достижения наименьших показателей критерия оптимальности (*D*2/*D*1). Результаты расчетов приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты расчетов соотношения *fopt*/

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Оптимальная частота  ультразвука  (Гц) | Угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя (рад/с) | Соотношение  параметров f/ω | Показатели  критерия оптимальности  (*D*2/*D*1) |
| 40 000 | 78,5 | 509,55 | 0,83 |
| 99,5 | 402,01 | 0,8 |
| 130,9 | 305,6 | 0,85 |

По полученным расчетным показателям *fopt*/ составлена диаграмма зависимости показателей критерия оптимальности (*D2*/ *D1)* от их значений (рисунок 3.24).

Рисунок 3.24 – Изменение показателей критерия оптимальности от значений соотношения частоты ультразвука к угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя, *fopt* /

Из диаграммы на рисунке 3.24 следует, что при соотношении параметров *f*/, равное 402,01, было получено минимальное значение показателя критерия оптимальности. Это говорит о том, что именно при таком условии достигается наименьший уровень показателя дымности газа среди всех трех исследованных случаев. Отмеченный минимум указывает на оптимальное сочетание параметров частоты ультразвука и угловой скорости коленчатого вала, при котором обеспечивается наилучшая эффективность очистки газа. Следовательно для достижения наилучшей степени очистки выхлопных газов в стенде ультразвукового глушителя рекомендуется настроить частоту ультразвука и угловую скорость вращения коленчатого вала двигателя таким образом, чтобы соотношение 𝑓𝑜𝑝𝑡/ *ω* было близким к 402.01.

Также были проведены дополнительные экспериментальные исследования, согласно которым, определена оптимальная длина осаждения частиц (рисунки 3.25 и 3.26).

Рисунок 3.25 – Оптимальная длина осаждения частиц при числе оборотов коленчатого вала двигателя 950 об/мин

Рисунок 3.26 – Оптимальная длина осаждения частиц при числе оборотов коленчатого вала двигателя 1250 об/мин

По полученным диаграммам следует, что оптимальная длина осаждения частиц составляет 0,4 м при угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя 99,5 рад/с и 130,9 рад/с. Это значение было выявлено на основе наблюдений за наибольшим значением массы осаждения частиц после воздействия ультразвука.

Выводы по третьему разделу

- изучен процесс очистки газа в ультразвуковом глушителе. На основе проведенного литературного обзора определены ключевые стадии, временные интервалы, силы, влияющие на движение частиц газа. Установлены параметры, влияющие на эффективность процесса коагуляции и в зависимости от их возможности регулирования при работе ультразвукового глушителя они были распределены на регулируемые и нерегулируемые;

- выбран критерий оптимальности для работы ультразвукового глушителя – соотношение дымности газа после и до воздействия ультразвука;

- установлены основные параметры, определяющие режим работы и конструктивные характеристики ультразвукового глушителя. Получены критерии подобия, позволяющие разработать методику расчета конструкции и оценить эффективность работы ультразвукового глушителя;

- разработан полноразмерный стенд ультразвукового глушителя. Составлены план и методика проведения экспериментальных исследований;

- результаты проведенных экспериментальных исследованийй на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя подтвердили снижение дымности газа при изменении частоты ультразвука. Показатели дымности газа максимально были сниженв до 35%. Экспериментально определено оптимальное значение частоты равное 40 кГц, при котором показатели критерия оптимальности имеют наименьшие значения. Общая степень очистки газа ультразвуком в глушителе составила 20-25%;

- в рамках проведенного эксперимента на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя определено оптимальное соотношение между параметрами частоты ультразвука и угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя при котором показатели критерия оптимальности имеют наименшие значения: 𝑓opt/ω=402,01. Для достижения наилучшей степени очистки выхлопных газов в стенде ультразвукового глушителя рекомендуется настроить частоту ультразвука и угловую скорость вращения коленчатого вала двигателя таким образом, чтобы соотношение 𝑓opt/*ω* было близким к 402.01;

- экспериментальным путем установлена оптимальная длина ультразвукового глушителя, по значениям показателей длины осаживания и массы осаждаемых частиц газа, полученных на разных значениях числа оборотов двигателя. Оптимальная длина глушителя, при которой достигается наилучшее осаждение частиц составило 0,4 м.

4 Реализация результатов исследования

4.1 Сравнение электроимпульсного и ультразвукового глушителей

Глушители, базирующиеся на принципах электроимпульсного и ультразвукового методов, представляют собой инновационные решения для улучшения степени очистки выхлопных газов и повышения эффективности работы системы очистки (выпуска) автомобилей. Для подтверждения целесообразности и потенциала применения электроимпульсных и ультразвуковых глушителей в автомобилях были проведены соответствующие экспериментальные исследования, представленные во 2 и 3 главах диссертации. Результаты этих исследований включают в себя получение значений показателя критерия оптимальности работы предлагаемых глушителей. Подробные выводы и данные экспериментов представлены в таблице 4.1. Следует отметить, что экспериментальные исследования проведены на дизельном двигателе автомобиля.

Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных исследований по определению значений показателя критерия оптимальности работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей дизельного двигателя

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вид глушителя | 78,5 рад/с  (750 об/мин) | 99,5 рад/с  (950 об/мин) | 130,9 рад/с  (1250 об/мин) |
| Показатели критерия оптимальности (*D2/D1*) | | |
| Электроимпульсный | 0,9 | 0,85 | 0,74 |
| Ультразвуковой | 0,83 | 0,8 | 0,85 |

На основе полученных результатов была построена диаграмма изменения показателей критерия оптимальности (*D2/D1*) в электроимпульсном и ультразвуковом глушителях дизельного двигателя (рисунок 4.1).

Рисунок 4.1 – Результаты экспериментальных исследований по определению соотношения показателей дымности газа в электроимпульсном и ультразвуковом глушителях дизельного двигателя

Согласно результатам экспериментальных исследований следует, что с последующим увеличением угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя у электроимпульсного глушителя наблюдается постепенное уменьшение значений показателя критерия оптимальности и при угловой скорости 130,9 рад/с его значение составило 0,74, что значительно меньше чем у ультразвукового глушителя. Также у ультразвукового глушителя наблюдается более переменчивая картина в изменении показателя критерия оптимальности. Если на начальных значениях угловой скорости показатели критерия оптимальности уменьшаются, то на следующем значении угловой скорости он увеличивается и становится больше чем у электроимпульсного глушителя. Такой результат объясняется тем, что электроимпульсный глушитель обладает более который позволяет эффективно ионизировать газ, расщиплять и агломерировать его частицы, что способствует их мгновенному удалению из газового потока. За счет ионизации потока газа и последующего его электрокоагуляции процесс очистки проходит стабильно и плавномерно, тем самым гарантируя эффективную и устойчивую работу глушителя.

В ультразвуковом глушителе с последующим увеличением угловой скорости двигателя увеличивается скорость потока газа. Чем выше скорость газа, тем меньше времени имеется для образования процесса коагуляции частиц. Это связано с тем, что чем быстрее движется газ, тем быстрее происходит перемещение частиц в потоке, и, следовательно, меньше времени они проводят в контакте друг с другом. Таким образом, в рамках проведенных экспериментов и полученных результатов на дизельном двигателе, электроимпульсный глушитель обеспечивает более стабильные показатели очистки газа при различных значениях угловой скорости. Однако с учетом соответствующей регулировки значений частоты ультразвука от изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя, возможно достижение эффективной очистки газа в ультразвуковом глушителе даже при высоких скоростях потока газа.

Также было проведено сравнение экспериментальных данных, полученных на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя. Эти данные включают в себя результаты измерения массы осаживаемых частиц газа в дизельном двигателе (раздел 3.6), которые были сопоставлены с результатами аналогичных экспериментов, проведенных на бензиновом двигателе в диссертационной работе Сарсембекова Б.К. [128, c.74]. Результаты экспериментальных исследований по изменению массы осаживаемых частиц выхлопного газа после и до воздействия ультразвуком глушителе для дизельного и бензинового двигателей представлены в таблицах 4.2 и 4.3.

Таблицы 4.2 – Изменение массы осаживаемых частиц выхлопного газа в ультразвуковом глушителе дизельного двигателя

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Длина осаживания частиц, (м) | Масса осевших частиц (г) при (99,5 рад/с) | | Прирост  массы осевших частиц | Масса осевших частиц (г) при (99,5 рад/с) | | Прирост  массы осевших частиц |
| Воздействие ультразвука | | Воздействие ультразвука | |
| До | После | До | После |
| 0,1 | 0,11 | 0,1 | -0,09 | 0,32 | 0,87 | 0,2 |
| 0,2 | 0,06 | 0,14 | 1,33 | 0,41 | 0,93 | 1,26 |
| 0,3 | 0,12 | 0,21 | 0,75 | 0,53 | 0,94 | 0,77 |
| 0,4 | 0,23 | 0,32 | 0,39 | 0,64 | 0,98 | 0,53 |
| 0,5 | 0,15 | 0,28 | 0,86 | 0,7 | 0,69 | -0,01 |
|  |  |  | 3,24 |  |  | 2,75 |

Таблица 4.3 – Изменение массы осаживаемых частиц выхлопного газа в ультразвуковом глушителе бензинового двигателя

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Длина осаживания частиц, (м) | Масса осевших частиц (г) при  (99,5 рад/с) | | Прирост  массы осевших частиц | Масса осевших частиц (г) при (130,9 рад/с) | | Прирост  массы осевших частиц |
| Воздействие ультразвука | | Воздействие ультразвука | |
| До | После | До | После |
| 0,1 | 0,25 | 0,34 | 0,36 | 0,7 | 1,07 | 0,52 |
| 0,2 | 0,16 | 0,21 | 0,31 | 0,39 | 1,09 | 1,79 |
| 0,3 | 0,11 | 0,14 | 0,27 | 0,12 | 0,75 | 5,25 |
| 0,4 | 0,05 | 0,45 | 8 | 0,62 | 0,84 | 0,35 |
| 0,5 | 0,1 | 0,38 | 2,8 | 0,31 | 0,7 | 1,25 |
|  |  |  | 11,74 |  |  | 9,16 |

Согласно полученным результатам экспериментальных исследований были составлены соответствующие диаграммы, показывающие прирост массы осевших частиц после воздействия на газ ультразвуком в дизельных и бензиновых двигателях (рисунки 4.2 и 4.3).

Рисунок 4.2 – Прирост массы осевших частиц после применения ультразвука в дизельных и бензиновых двигателях при значении ω=99,5 рад/с.

Рисунок 4.3 – Прирост массы осевших частиц после применения ультразвука в дизельных и бензиновых двигателях при значении ω=130,9 рад/с

По полученным диаграммам следует, что больший прирост массы осевших частиц после воздействия на газ ультразвуком было замечено в бензиновом двигателе нежели в дизельном. Такой результат объясняется тем, что дизельные двигатели обычно имеют более сложную систему очистки выхлопных газов, такую как сажевые фильтры, которые могут более эффективно улавливать твердые частицы. У бензинового двигателя менее развита система очистки выхлопных газов, что может привести к более высоким показателям дымности и большему осаждению твердых частиц после воздействия ультразвука.

Кроме того при работе бензинового двигателя в атмосферу выделяется большее количество углекислого газа (CO2), что приводит к высвобождению большого количества твердых частиц в потоке газа. В процессе воздействия ультразвука углекислый газ взаимодействует с другими компонентами выхлопных газов, такими как углеводороды, оксиды азота и твердые частицы. Эти химические реакции приводят к образованию новых частиц, что значительно влияет их на процессы осаждения. Также присутствие углекислого газа в выхлопных газах изменяет их физико-химические свойства, такие как вязкость, плотность, теплопроводность и т. д. Эти изменения влияют на поведение твердых частиц в газовом потоке и на процессы их осаждения после воздействия ультразвуком.

Представленный анализ результатов экспериментальных исследований обосновывает применение электроимпульсных и ультразвуковых глушителей. Дизельные двигатели, как правило, имеют потенциал к более высоким выбросам вредных веществ. По сравнению с бензиновыми двигателями особенно заметно увеличение выбросов оксидов азота (NOx) в дизельных двигателях. Образование оксида азота (NOx) в выхлопных газах способствует повышению показателей дымности. Однако дизельные двигатели также обладают высокой топливоэффективностью и вследствие этого выделяют меньше углекислого газа (CO2) на километр нежели бензиновый двигатель.

В условиях езды на дороге дизельные двигатели наиболее эффективны при дальних поездках, на открытых дорогах, чем в городских условиях с постоянными остановками и стартами. А бензиновые двигатели, наоборот проявляют себя лучше в городском движении благодаря меньшему весу и возможности эффективного использования старт-стоп систем.

Учитывая результаты экспериментальных исследований, особенности каждого вида двигателя, а также условия езды автомобиля, рекомендуется использование электроимпульсных глушителей для дизельных двигателей и ультразвуковых глушителей для бензиновых. Таким образом, предлагаемые глушители помогают оптимизировать работу двигателей и снизить вредные выбросы, соответствуя требованиям по экологии и обеспечивая эффективность их работы в зависимости от условий эксплуатации.

4.2 Пример методики расчета конструкции и режима работы электроимпульсного глушителя автомобиля

Во второй главе (в разделе 2.3) диссертации были определены критерии, описывающие работу и учитывающие геометрические характеристики электроимпульсного глушителя.

Первый критерий характеризует эффективность работы электроимпульсного глушителя соотношением мощностей, а именно мощности работы электроимпульсного глушителя к мощности сопротивления его работе.Этот критерий показывает насколько насколько эффективно глушитель использует поданную на нее электрическую мощность.

, (4.1)

Критерий должен оставаться в пределах нуля и единицы. Чем ближе этот коэффициент к 0, тем меньше сопротивления к вырабатываемоей энергии. Если коэффициент мощности близок к 1, это означает, что большая часть энергии расходуется на преодоление сопротивлений, что может привести к нежелательным последствиям для электроимпульсного глушителя. Следовательно:

. (4.2)

Рассмотрим правую часть неравенства, когда критерий меньше 1.

(4.3)

По полученному неравенству справедливо определить допустимое значение параметра диаметра глушителя, при котором осуществляется оптимальная его работа:

. (4.4)

Произведение силы электрического тока к напряжению равно общей мощности электического оборудования глушителя, которая согласно техничесим характеристикам генератора высокого напряжения составляет 250 Вт. Учитывая максимально возможную скорость газа в глушителе =15 м/с и значение плотности выхлопного газа, которое в зависимости от своего состава может варьироваться от 0,5 до 2 кг/м3 (принятое за ρ=1 кг/м3), диаметр глушителя был рассчитан следующим образом:

=0,27

Согласно расчетам следует, что оптимальное значение диаметра глушителя не должно превышать 0,27 м.

Затем был рассчитан критерий при разных значениях числа оборотов коленчатого вала двигателя 750, 1280 и 4500 оборотов в минуту. Эти значения были выбраны для оценки критерия при минимальных, средних и максимальных оборотах. В ходе экспериментальных исследований на полноразмерном стенде глушителя также были получены данные о скорости газа в диапазоне от 750 до 1280 оборотов в минуту. Принимая 4500 об/мин как максимальное допустимое значение числа оборотов коленчатого вала двигателя макисмальная скорость газа также была условно принята за 15 м/с. Численные и расчетные значения параметров критерия k1 представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Численные значения параметров критерия k1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметры | Обозна-чение | Единица измерения | Показатели | | |
| Частота оборотов коленчатого вала двигателя | n | об/мин | 750 | 1280 | 4500 |
| Скорость газа |  | м/с | 5,4 | 9,3 | 15 |
| Диаметр глушителя | d | м | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| Мощность установки | P | Вт | 250 | 250 | 250 |
| Плотность газа |  | кг/м3 | 1 | 1 | 1 |

На основе вычисленных значений критерия можно заключить, что в рассматриваемых диапазонах числа оборотов коленчатого вала двигателя его показатели не превышает единицы. Это свидетельствует о том, что электроимпульсный глушитель функционирует оптимально, и его мощность достаточна для успешного преодоления сопротивлений, возникающих во время его работы.

Следующий критерий *k*2 позволяет определить режим течения газа внутри электроимпульсного глушителя, так как он соответствует критерию Рейнольдса:

, (4.5)

Критерий Рейнольдса (*Re*) используется для определения перехода газового потока от ламинарного (плавного) к турбулентному состоянию. Общепринято, что *Re* в диапазоне от 2000 до 4000 является приблизительной границей между ламинарным и турбулентным потоком. То есть, если *Re* превышает 4000, газовый поток переходит к турбулентному состоянию. Следовательно допустимое значение критерия *k*3 должно быть в пределах до 4000:

. (4.6)

Отсюда следует:

, (4.7)

По полученному неравенству определено допустимое значение динамической вязкости газа, при котором не возникает окончательный переход движения газа в турбулентный. Следовательно неравенство примет следующий вид:

. (4.8)

Согласно расчетам следует, что допустимое значение динамической вязкости газа не должно превышать Па∙с.

Затем был рассчитан критерий при соответствующих значениях числа оборотов коленчатого вала двигателя. Численные и расчетные значения параметров критерия k2 представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Численные значения параметров критерия k2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметры | Обозна-чение | Единица измерения | Показатели | | |
| Число оборотов коленчатого вала двигателя | n | об/мин | 750 | 1280 | 4500 |
| Скорость частицы газа |  | м/с | 5,4 | 9,3 | 15 |
| Диаметр глушителя | d | м | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| Плотность газа |  | кг/м3 | 1 | 1 | 1 |
| Динамическая вязкость газа |  | Па∙с |  |  |  |

Согласно результатам вычислений, наблюдается последовательное увеличение значений критерия k2. Это увеличение объясняется увеличением скорости движения газовых частиц, вызванная повышением числа оборотов коленчатого вала двигателя.

На 750 об/мин коленчатого вала двигателя преобладает ламинарное движение газа. Однако при дальнейшем увеличении числа оборотов коленчатого вала в 1280 об/мин показатели критерия k2 также увеличились. Следовательно увеличивается вероятность перехода ламинарного режима газа в турбулентный, а при 4500 об/мин наблюдается явный переход режима газа в турбулентный. Следовательно, при диапозоне от 750 до 4500 об/мин работа электроимпульсного глушителя считается оптимальной, ведь газ остается в пределах ламинарного движения. Однако в районе 4500 об/мин и выше характерна вероятность возникновения турбулентного режима газа, что может существенно повлиять на эффективность работы электроимпульсного глушителя и на процесс очистки газа.

Третий критерий учитывает конструктивные параметры электроимпульсного глушителя и камеры сгорания двигателя, что позволяет определить их значения для разработки технического задания по проектированию электроимпульсного глушителя:

, (4.9)

Соотношение параметров критерия должно быть равно единице, с целью соблюдения всех геометрических и масштабных соотношений, между параметрами описывающие конструкцию глушителя. Следовательно:

. (4.10)

Если представить объем глушителя через , то критерий примет следующий вид:

, (4.11)

Если брать отдельно соотношение объема глушителя () к объему камеры сгорания () оно бывает в диапазоне от 1:2 до 1:10 в зависимости от конструкции и геометрических характеристик глушителя и двигателя. Однако с учетом наличия параметра расстояния между электродами в критерии k3, и ввиду его возможного малого значения (в 10-3 м), необходимо определить оптимальное соотношение между параметрами критерия. Так как значение некоторых параметров нам известны (диаметр глушителя 2,7∙10-1 м и объем камеры сгорания двигателя 2,685∙10-3 м), а предпологаемые значения неизвестных параметров должно быть в определенных значениях (длина глушителя в 10-1 м и расстояние между электродами в 10-3 м) то было рассчитано оптиальное соотношение между параметрами, которое соответствует 1:100. Cогласно полученному уравнению определено оптимальное значение длины глушителя:

. (4.12)

Для определения значения расстояния между электродами Δ было использовано уравнением, полученное при решении дифференциального уравнения движения частицы газа. Это уравнение было составлено для описания математичекой модели движения частицы газа в коронном разряде, представленной в диссертационной работе Крючкова Е.Ю [130, c.87].

*,* (4.13)

Отсюда следует, что:

*.* (4.14)

По полученному уравнению (4.14) были проведены расчеты для установления оптимального расстояния между электродами. Необходимые параметры для расчетов представлены в таблице 4.6

Таблица 4.6 – Численные значения параметров для установления оптимального расстояния между электродами

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметры | Обозначение | Единица измерения | Показатели | | |
| Число оборотов коленчатого вала двигателя | n | об/мин | 750 | 1280 | 4500 |
| Напряжение | U | B | 35000 | 35000 | 35000 |
| Величина заряда |  | Кл |  |  |  |
| Радиус глушителя | R | м | 0,135 | 0,135 | 0,135 |
| Скорость частицы газа |  | м/с | 5,4 | 9,3 | 15 |
| Средний радиус частицы газа | r | м |  |  |  |
| Динамическая вязкость газа |  | Пас |  |  |  |

Согласно полученным результатам расчетов следует что, оптимальное расстояние между электродами при 750 об/мин составляет 0,008 м, при 1280 об/мин – 0,0042 м и при 4500 об/мин – 0,0026 м. При таких значениях расстояний будет гарантировано возникать коронный разряд и очистка газа будет считаться эффективной.

На основе расчетных значений расстояний между электродами по уравнению (4.12) определено оптимальное значение длины электроимпульсного глушителя:

По расчетам следует, что оптимальное значение дины электроимпульсного глушителя составляет 0,32 м.

Четвертый критерий позволяет определить частоту электроимпульса через число оборотов или через угловую скорость коленчатого вала двигателя:

, (4.15)

Однако согласно ранее полученным результатам исследования было установлено, что значение частоты *f* должно соответствовать установленному значению параметра расстояния между электродами Δ для обеспечения оптимальной работы электроимпульсного глушителя в процессе очистки газов. Следовательно значение частоты электроимпульса определяется не только взависимости от изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя *ω*, а также от установленного значения расстояния между электродами Δ. Для того, чтобы определить мгновенное изменение по : критерий был преобразован в следующий вид:

. (4.16)

На основе результатов экспериментальных исследований, проведенных для полноразмерного стенда электроимпульсного глушителя и полученным значениям соотношения показателей дымности газа (критерия оптимальности работы стенда электроимпульсного глушителя), в зависимости от изменения параметров частоты электроимпульса, расстояния между электродами и угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя (раздел 2.10) был проведен регрессионно-корреляционный анализ. Согласно результатам проведенного анализа по наибольшим значениям коэффициентов корреляции (0,98), детерминации (0,96) и наименьшим значениям средней ошибки аппроксимации (1,45%) было выбрано уравнение показательной регрессии для описания зависимости изменения соотношения показателей дымности газа от параметров :

(4.17)

Работа электроимпульсного глушителя в автомобиле должна соответствовать законодательным стандартам, которые предусматривают снижение токсичности отработавших газов и не допускают превышение установленных нормативов для показателей дымности. Законодательство Республики Казахстан в области выбросов транспортных средств основано на международных стандартах «Евро». Евро 6 является последним стандартом выбросов, введенным в Европейском Союзе. На 2024 год в Казахстане действуют нормы «Евро 4», хотя планируется переход к более строгим стандартам в будущем. Тем не менее, максимальная допустимая дымность газа в обоих стандартах составляет до 0.5 м-1 (39,35%). Следовательно система выпуска отработавших газов в автомобилях должна гарантировать, что уровень дымности газов остается в пределах допустимых значений при различных оборотах двигателя. Поэтому при использовании электроимпульсного глушителя в этой системе дымность газов не должна превышать 0.5 м-1 при любых оборотах. Такой показатель дымности свидетельствует о оптимальной работе электроимпульсного глушителя. Для обеспечения оптимальной работы электроимпульсного глушителя при таких покзателях дымности необходимо определить оптимальное соотношение параметров *f к Δ и ω*. Для этого используем уравнение полученное в результате регрессионно-корреляционного анализа:

. (4.18)

Согласно расчету следует, что оптимальное соотношение при котором достигается наименьшие показатели дымности газа равно значению . По полученному значению этого соотношения определим оптимальные значения частоты электроимпульса в зависимости от разных значений угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя и рассчитанных оптимальных значений расстояний между электродами:

При угловой скорости ω=78,5 рад/с (750 об/мин) и расстояния между электродами Δ=0,008 м частота электроимпульса :

23,04 Гц

При угловой скорости ω=130,9 рад/с (1280 об/мин) и расстояния между электродами Δ=0,004 м частота электроимпульса :

20,43 Гц

При угловой скорости ω=471 рад/с (4500 об/мин) и расстояния между электродами Δ=0,026 м частота электроимпульса :

46,57 Гц

Согласно полученным зависимостям между частотой электроимпульса, расстоянием между электродами и угловой скоростью вращения коленчатого вала двигателя следует, что необходимо настраивать частоту электроимпульса в соответствии с различными значениями угловой скорости с установлением оптимального расстояни между электродами. Поэтому оборудование электроимпульсного глушителя должно обладать возможностью изменения частоты электроимпульса в зависимости от изменения угловой скорости двигателя и расстояния между электродами. Регулировка этих параметров позволит снизить уровень дымности выбросов газа, повысить степень их очистки и обеспечить более эффективную работу электроимпульного глушителя и системы выпуска отработавших газов на автомобиле.

Таким образом разработанная методика расчета конструкции и режима работы электроимпульсного глушителя автомобилей позволяет определить оптимальные показатели его параметов конструкции и регулирующих параметров режима работы электроимпульсного глушителя при разных значениях числа оборотов коленчатого вала двигателя. Кроме того численные показатели безразмерных критериев *k*1, *k*2,  подтверждает эффективность работы самого глушителя и положительно характеризует поведение потока газа.

4.3 Пример методики расчета конструкции и режима работы ультразвукового глушителя автомобиля

В третьей главе раздела 3.2 диссертации были установлены критерии, описывающие работу ультразвукового глушителя и учитывающие его конструктивные параметры.

Первый критерий позволяет определить основные параметры конструкции и режима работы ультразвукового глушителя. Он описывает соотношение частоты ультразвука к числу оборотов коленчатого вала двигателя и учитывает соотношение конструктивных параметров глушителя к объему камеры сгорания двигателя внутреннего сгорания.

*,* (4.19)

Согласно полученным экспериментальным результатам соотношение частоты ультразвука к угловой скорости коленчатого вала двигателя является регулирующим параметром, благодаря которому возможно установить оптимальный режим работы ультразвукового глушителя. Следовательно критерий k1 является функцией регулирования режима работы ультразвукового глушителя и связи с этим он был преобразован с учетом отношения f/ω:

*,* (4.20)

Функция регулирования представляет собой коэффициент эффективности работы ультразвукового глушителя, которое может колебаться от 0 до 1. Коэффициент эффективности должен стремиться к единице для осуществления настройки и управления работой ультразвуковым глушителем, а также для максимального приближения к оптимальному режима его работы. В свою очередь соотношение конструктивных параметров критерия должно быть равно единице, с целью соблюдения всех геометрических и масштабных соотношений, между параметрами описывающие конструкцию глушителя Следовательно общее значение критерия должно быть:

*,* (4.21)

Отсюда следует, что:

*.* (4.22)

Исходя из полученного неравенства (4.22) было определено оптимальное значение диаметра глушителя:

*.* (4.23)

Согласно расчетам следует, что оптимальное значение диаметра глушителя не должно превышать 0,27 м.

Критерий k2 соответствует условиям критерия Рейнольдса и как в электроимпульсном глушителе позволяет оценить режим течения газа внутри ультразвукового глушителя:

, (4.24)

Следовательно и согласно этому неравенству было определено допустимое значение динамической вязкости газа, при котором переход движения газа в турбулентный режим происходить не будет. Таким образом, неравенство приобретает следующий вид:

. (4.25)

Согласно расчетам следует, что допустимое значение динамической вязкости газа не должно превышать Па∙с.

Затем также производился расчет критерия k2 при различных оборотах коленчатого вала двигателя: 750, 1250 и 4500 оборотов в минуту. Эти значения были выбраны для оценки критерия k2 при минимальных, средних и максимальных оборотах. В ходе экспериментов на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя также получены данные о скорости газа в пределах от 750 до 1250 оборотов в минуту. Учитывая, что 4500 об/мин считается максимально допустимым значением числа оборотов коленчатого вала двигателя, скорость газа условно принята равной 15 м/с. Численные и расчетные значения параметров критерия k2 представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Численные значения параметров критерия k2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметры | Обозна-чение | Единица измерения | Показатели | | |
| Число оборотов коленчатого вала двигателя | n | об/мин | 750 | 1250 | 4500 |
| Скорость газа |  | м/с | 5,4 | 9,3 | 15 |
| Диаметр глушителя | d | м | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| Плотность газа |  | кг/м3 | 1 | 1 | 1 |

Результаты вычислений свидетельствуют о последовательном увеличении критерия k2 в связи с ростом скорости движения газовых частиц при повышении оборотов коленчатого вала двигателя. При 750 об/мин и 1250 об/мин преобладает ламинарное движение, но при 4500 об/мин наблюдается постепенный переход к турбулентному режиму. Таким образом, эффективная работа ультразвукового глушителя считается оптимальной в диапазоне от 750 до 4500 об/мин, но на более высоких оборотах переход потока газа в турбулентный режим неизбежен.

Третий критерий *k3* описывает соотношениемассы осевших частиц (сажи) на массу газа прошедшего через ультразвуковой глушитель.

, (4.26)

Критерий *k3* соответствует критерию коагуляции, полученного из математической модели диссертационной работы Сарсембекова Б.К., в которой масса газа определяется по следующей формуле:

, (4.27)

Отсюда следует:

. (4.28)

Коэффициент коагуляции в свою очередь зависит от массы осаждения частиц внутри глушителя и длины осаждения частиц. Для расчета коэффициента коагуляции были использованы экспериментальные результаты, полученные при проведении дополнительных экспериментальных исследований на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя. Результаты проведенных экспериментальных исследований представлены в разделе 3.6.

Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований было выявлено, что оптимальная длина глушителя соответствует длине осаживания частиц, при которой фиксируется максимальная масса осевшей сажи. Максимальная масса осевшей сажи была зафиксирована при длине осаживания частиц в 0,4 метра. Таким образом, оптимальной длиной глушителя является значение равное *Lopt*=0,4 м.

Коэффициент коагуляции *K* измеряется в диапазоне от 0 до 1, и чем он ближе к 1, тем выше вероятность коагуляции (слипания) частиц. Высокий коэффициент коагуляции указывает на более эффективный процесс агломерации частиц в ультразвуковом глушителе. Следовательно:

, (4.29)

, (4.30)

Рассмотрев условие , было определено максимальное значение массы осевшей сажи, при которой достигается наивысшая вероятность слипания частиц (коагуляции):

. (4.31)

Затем по результатам экспериментальных исследований проведен расчет критерия k3 при оборотах коленчатого вала двигателя: 950 и 1250 оборотов в минуту

Без воздействия ультразвука:

С воздействием ультразвука:

По результатам расчета критерия k3 была построена диаграмма изменения коэффициента коагуляции от значений числа оборотов коленчатого вала двигателя (рисунок 4.4).

Рисунок 4.4 – Изменение коэффициента коагуляции в зависимости от значений частоты оборотов коленчатого вала двигателя

Согласно диаграмме на рисунке 4.4 следует, что после воздействия ультразвука на газ наблюдаются более высокие значения коэффициента коагуляции *К* по сравнению с условиями, когда ультразвук не был применен. Эти результаты подтверждают, что ультразвук способствует усилению процесса коагуляции, который обычно происходит между частицами газа естественным образом. Интенсификация процесса коагуляции в свою очередь приводит к улучшению очистки газа.

Затем согласно критерию k1, где конструкттивные параметры глушителя были взяты за const и по полученным значениям показателя критерия оптимальности от изменения параметров частоты ультразвука и угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя был проведен регрессионно-корреляционный анализ. В результате анализа было выбрано уравнение показательной регрессии для объяснения связи между изменением показателя критерия оптимальности (соотношения показателей дымности газа) от регулирующих параметров *f* и *ω*. Это уравнение обладает высокими значениями коэффициентов корреляции (0,97) и детерминации (0,98), что указывает на сильную связь между переменными, а также низким значением средней ошибки аппроксимации (1,86%):

(4.32)

Ультразвуковый глушитель в автомобиле должен работать в соответствии с законодательными нормами, которые нацелены на уменьшение вредных выбросов отработавших газов и не допускают превышение установленных нормативов для показателей дымности. Согласно действующему стандарту «Евро» в Республике Казахстан, автомобили обязаны соответствовать установленным пределам допустимых значений дымности, которое равно 0,5 м-1 . Следовательно в условиях работы ультразвукового глушителя в системе выпуска отработавших газов автомобилей максимально возможное уменьшение показателей дымности газа должно быть не более 0,5 м-1. Для обеспечения оптимальной работы ультразвукового глушителя при таких показателях дымности необходимо определить оптимальное соотношение параметров *f и ω*. Для этого используем уравнение полученное по в результате регрессионно-корреляционного анализа:

Согласно расчету следует, что оптимальное соотношение при котором достигается наименьшие показатели дымности газа равно значению . По полученному значению этого соотношения определено оптимальные значения частоты ультразвука в зависимости от разных значений угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя:

При угловой скорости вращения коленчатого вала ω=78,5 рад/с (750 об/мин) *f*1:

При угловой скорости вращения коленчатого вала ω=272,63 рад/с (2600 об/мин) *f*2:

При угловой скорости вращения коленчатого вала ω=471 рад/с (4500 об/мин) *f*3:

Таким образом согласно полученным зависимостям между частотой и угловой скоростью вращения коленчатого вала двигателя следует, что необходимо настраивать частоту ультразвука в соответствии с различными значениями угловой скорости. Поэтому оборудование ультразвукового глушителя должно обладать возможностью изменения частоты ультразвука в зависимости от угловой скорости двигателя. Регулировка этих параметров позволит снизить уровень дымности выбросов газа, повысить степень их очистки и обеспечить более эффективную работу ультразвукового глушителя и системы выпуска отработавших газов на автомобиле.

4.4 Расчет экономической эффективности от внедрения электроимпульсного глушителя

Экономическую эффективность (Э) от применения электроимпульсного глушителя определяется по показателям платы (П) за выбросы [185]:

, (4.33)

где П1 – годовая плата за выбросы без применения электроимпульсного глушителя, тенге/год;

П2 – годовая плата за выбросы с применением электроимпульсного глушителя, тенге/год.

Исходные данные для расчета экономической эффективности от внедрения электроимпульсного глушителя представлены в таблице 4.8. Значение расхода топлива было дополнительно получено при проведении экспериментальных исследований на стенде электроимпульсного глушителя.

Таблица 4.8 **–** Исходные данные для расчета экономической эффективности внедрения электроимпульсного глушителя

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Расход топлива (л/ч) | Дымность автомобиля без воздействия электроимпульса | Дымность автомобиля с воздействием электроимпульса |
| 0,9 | 0,39 | 0,29 |

Провден расчет годовой платы за выбросы без применения электроимпульсного глушителя.

Объем выбросов одного автомобиля , *л/час*:

, (4.34)

*л/час,*

Объем выбросов одного автомобиля , в тоннах:

.

*т/ч* (4.35)

где плотность дизельного топлива (в кг/л)/1000, = 0,84 кг/л.

Годовой объем выбросов одного автомобиля T, в тоннах:

,

т  (4.36)

где максимальная эксплуатация одного легкового автомобиля в день, = 8 часов;

Годовая эксплуатация одного легкового автомобиля в день, = 365 дней;

Годовой объем выбросов всех автомобилей, в тоннах:

. (4.37)

*т.*

где среднее количество автомобилей по Карагандинской области N=151 000.

Плата за выбросы в атмосферу от легковых автомобилей:

. (4.38)

где TГ – годовой объем выбросов всех автомобилей, в тоннах;

Нпт –норматив платы i-того вида топлива, (3450 тенге);

Kэ – коэффициент экологической ситуации, (1-5);

Киi – коэффициент индексации для i-го вида топлива, (0,63);

Kг – дополнительный коэффициент для территории города, (1-2)

Кост – дополнительный коэффициент для ООПТ, курортов, зон отдыха (2).

Тогда годовая плата за выбросы без применения электроимпульсного глушителя составило:

Проведен рассчет годовой платы за выбросы с применения электроимпульсного глушителя.

Объем выбросов одного автомобиля T, *л/час*:

*л/час,*

Объем выбросов одного автомобиля T, в тоннах:

*т/ч.*

Плотность дизельного топлива (в кг/л)/1000, = 0,84 кг/л.

Годовой объем выбросов одного автомобиля T, в тоннах:

*т,*

где максимальная эксплуатация одного легкового автомобиля в день, = 8 часов;

Годовая эксплуатация одного легкового автомобиля в день, = 365 дней;

Годовой объем выбросов всех автомобилей, в тоннах:

*т.*

где среднее количество автомобилей по Карагандинской области составляет N=151 000.

Плата за выбросы в атмосферу от легковых автомобилей:

. (4.39)

где TГ – годовой объем выбросов одного автомобиля T, в тоннах;

Нпт –норматив платы i-того вида топлива, (3450 тенге);

Kэ – коэффициент экологической ситуации, (1-5)

Киi – коэффициент индексации для i-го вида топлива, (0,63);

Kг – дополнительный коэффициент для территории города, (1-2);

Кост – дополнительный коэффициент для ООПТ, курортов, зон отдыха, (2).

Тогда годовая плата за выбросы с применением электроимпульсного глушителя составило:

*.*

Экономический эффект от применения электроимпульсного глушителя:

Показатели платы за выбросы значительно сокращаются при внедрении электроимпульсного глушителя на автомобиль. Таким образом результаты экономического расчета показали эффективность внедрения электроимпульсного глушителя в систему очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания автомобилей.

4.5 Расчет экономической эффективности от внедрения ультразвукового глушителя

Экономическая эффективность (Э) от внедрения ультразвукового глушителя в систему очистки автомобиля также расчитана по такой же методике расчета, примененной для электроимпульсного глушителя (раздел (4.3)).

Исходные данные для расчета экономической эффективности от внедрения ультразвукового глушителя представлены в таблице 4.9. Значение расхода топлива было дополнительно получено при проведении экспериментальных исследований на стенде ультразвукового глушителя.

Таблица 4.9 **–** Исходные данные для расчета экономической эффективности внедрения ультразвукового глушителя

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Расход топлива (л/ч) | Дымность автомобиля без воздействия электроимпульса | Дымность автомобиля с воздействием электроимпульса |
| 0,9 | 0,48 | 0,44 |

Проведен расчет годовой платы за выбросы без применения ультразвукового глушителя.

Объем выбросов одного автомобиля T, *л/час*:

*л/час,*

Объем выбросов одного автомобиля T, в тоннах:

*т/ч.*

где плотность топлива (в кг/л)/1000, = 0,84 кг/л.

Годовой объем выбросов одного автомобиля T, в тоннах:

*т,*

где максимальная эксплуатация одного легкового автомобиля в день, = 8 часов;

Годовая эксплуатация одного легкового автомобиля в день, = 365 дней;

Годовой объем выбросов всех автомобилей, в тоннах:

*т.*

где среднее количество автомобилей по Карагандинской области составляет N=151 000.

Плата за выбросы в атмосферу от легковых автомобилей:

*.*,(4.40)

где TГ – годовой объем выбросов всех автомобилей, в тоннах;

Нпт –норматив платы i-того вида топлива, (3450 тенге);

Kэ – коэффициент экологической ситуации, (1-5);

Киi – коэффициент индексации для i-го вида топлива, (0,63);

Kг – дополнительный коэффициент для территории города, (1-2)

Кост – дополнительный коэффициент для ООПТ, курортов, зон отдыха (2).

Тогда годовая плата за выбросы без применения ультразвукового глушителя составило:

Проведен расчет годовой платы за выбросы с применением ультразвукового глушителя.

Объем выбросов одного автомобиля T, *л/час*:

*л/час,*

Объем выбросов одного автомобиля T, в тоннах:

*т/ч.*

Где плотность топлива (в кг/л)/1000, = 0,84 кг/л.

Годовой объем выбросов одного автомобиля T, в тоннах:

*т,*

где максимальная эксплуатация одного легкового автомобиля в день, = 8 часов;

Годовая эксплуатация одного легкового автомобиля в день, = 365 дней;

Годовой объем выбросов всех автомобилей, в тоннах:

*т.*

где среднее количество автомобилей по Карагандинской области составило N=151 000.

Плата за выбросы в атмосферу от легковых автомобилей:

, (4.41)

где TГ – Годовой объем выбросов всех автомобилей, в тоннах:

Нпт –норматив платы i-того вида топлива, (3450 тенге);

Kэ – коэффициент экологической ситуации, (1-5)

Киi – коэффициент индексации для i-го вида топлива, (0,63);

Kг – дополнительный коэффициент для территории города, (1-2);

Кост – дополнительный коэффициент для ООПТ, курортов, зон отдыха, (2).

Тогда годовая плата за выбросы с применением ультразвукового глушителя составило:

*.*

Экономический эффект от применения ультразвукового глушителя:

Показатели платы за выбросы значительно сокращаются при внедрении ультразвукового глушителя на автомобиль. Таким образом результаты экономического расчета показали эффективность внедрения ультразвукового глушителя в систему очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания автомобилей.

4.6 Техническое задание на проектирование опытной конструкции электроимпульсного глушителя

1. Общие сведения:

Наименование проекта: проектирование опытной конструкции электроимпульсного глушителя для системы очистки дизельных двигателей автомобиля*.*

Область применения: Опытная конструкция электроимпульсного глушителя предназначена для улучшения эффективности очистки выхлопных газов и повышения общей экологичности дизельных автомобилей.

2. Цель и назначение разработки:

Целью создаваемой опытной конструкцииэлектроимпульсного глушителя является снижение вредных выбросов выхлопного газа в атмосферу в процессе эксплуатации дизельных автомобилей.

3. Источники разработки: (*Статьи/патенты*) (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Источники разработки

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Название статьи | Страна, наименование журнала  и выходные данные,  наукометрические показатели | Авторы |
| 1 | Development of calculation methodology for optimizing the operating mode of an electric pulse unit for cleaning exhaust gases | Communications - Scientific Letters of the University of Zilina (Slovakia) ISSN 1335-4205 Vol 26 (1), January 2024 (Article), pp. B41-B53. (*Scopus процентиль - 38*) | Kadyrov A.S.,  Kukesheva A.B.,  Kryuchkov Ye. Yu.,  Pak I.A.,  Kurmasheva B.K.,  Kabikenov S.Zh. |
| 2 | Studying the process of the internal combustion engine exhaust gas purification by an electric pulse | Communications - Scientific Letters of the University of Zilina (Slovakia) ISSN 1335-4205 Vol 24 (4), September 2022 (Article), pp. B275-B287. (*Scopus процентиль - 38*) | Kadyrov A.S.,  Kryuchkov Ye. Yu.,  Sinelnikov K.A.,  Ganyukov A.A.,  Sakhapov R.L.,  Kukesheva A.B. |
| 3 | Establishing the parameters of the operation mode of the electric pulse automobile muffler | Journal of Applied Engineering Science, 2024, Vol. 22, issue 1, pp. 89–99, *(Scopus percentile – 47).* DOI: 10.5937/jaes0-45196 | Kukesheva A.B.,  Kadyrov A.S.,  Kryuchkov Ye. Yu., |
| 4 | Establishment of Parameters of Electric Pulse Equipment Stor-age Device for Exhaust Gas Purification | Журнал «Труды университета», Караганда: НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова». 2023, №2 (91), C.217-223. DOI 10.52209/1609-1825\_2023\_2\_217 | Pak I. A.,  Suyunbayev Sh. M., Sakhapov R.L.,  Kryuchkov Ye. Yu.,  Kukesheva A.B. |
| 5 | Study of the process of electric pulse cleaning of internal com-bustion engine exhaust gases | Вестник КазАТК, 124(1), 75–84. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-124-1-75-84 | Kryuchkov Ye. Yu.,  Pak I. A.  Kadyrov A.S.,  Sakhapov R.L.,  Kukesheva A.B. |
| 6 | Автокөліктің пайдаланылған газдарын электроимпульсті бейтараптандыру процесін зерттеуге арналған эксперименттік қондырғыларды әзірлеу | Журнал «Труды университета», Караганда: КарТУ, 2023, №1 (89), C.201-205 DOI 10.52209/1609-1825\_2023\_1\_201 | Синельников К.А.,  Кукешева А.Б.  Крючков Е.Ю.,  Кызылбаева Э.Ж.,  Шебалин А.В. |
| 7 | Experimental determination of the purification degree of the exhaust gas in automobile muffler by electric pulse | Bulletin of L N Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series, 142(1), 23–31. Retrieved from <https://bultech.enu.kz/index.php/main/article/view/250> DOI: doi.org/10.32523/2616-7263-2023-142-1-23-31 | Kryuchkov Ye. Yu.,  Kukesheva A.B.  Kadyrov A.S.,  Kurmasheva B.K.,  Sinelnikov K. A. |

4. Технические требования (таблица 4.11)

Таблица 4.11 – Технические требования

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Категория | Требования |
| 1 | Производительность | - увеличить эффективность снижения выбросов вредных веществ и уменьшить показатели дымности газа: не более чем на 0,5 м-1 (39%). |
| 2 | Электроимпульсная система | - разработать систему электроимпульсной глушителя, которая обеспечивает эффективное воздействие на вредные частицы газа;  - работа электроимпульсной системы не должна оказывать большую нагрузку на двигатель и не отнимать значительную часть его мощности;  - установить оптимальное значение расстояния между электродами обеспечивающее эффективную очистку газа при изменении угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя;  - установить оптимальное значение частоты импульсов, обеспечивающее эффективную очистку газа при изменении угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя при установленных значениях оптимального расстояния между электродами; |
| 3 | Материалы | - конструкция электроимпульсного глушителя должна быть изготовлена из материала, обеспечивающая электроизоляцию;  -Материал должен быть устойчив к коррозии и высоким температурам. |
| 4 | Геометрия и размеры | - конструкция электроимпульсного глушителя должна быть спроектирована с учетом габаритов автомобиля;  - задать оптимальные размеры (длина и диаметр) глушителя. |
| 5 | Прочность и долговечность | - конструкция электроимпульсной системы очистки должна выдерживать все нагрузки;  - термическая стойкость: работа в диапазоне температур от 300 до 1000 |
| 6 | Монтаж | - конструкция электроимпульсного глушителя должна быть легко устанавливаемой на автомобиль;  - необходимо предусмотреть крепления и уплотнения для надежной фиксации конструкции системы и предотвращения утечек. |

5. Требования к проектированию (таблица 4.12)

Таблица 4.12 – Требования к проектированию

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Категория | Требования |
| 1 | Аэродинамические характеристики | предотвращение максимального сопротивления потока газов в глушителе. |
| 2 | Электроимпульсная система | - разработать электроимпульсную систему глушителя, которая обеспечивает оптимальную работу электронного блока управления, регулирующая подачу частоты электроимпульса и правильное распределение рабочего напряжения на свечи зажигания;  -обеспечить своевременное подключение свечей зажигания, образование коронного разряда при различных значениях угловой скорости двигателя. |

Продолжение таблицы 4.12

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Категория | Требования |
| 3 | Защитные меры | - предусмотреть защитные элементы для предотвращения повреждений электроимпульсного глушителя при эксплуатации;  - учесть вибрации и удары, характерные для различных условий движения автомобиля. |
| 4 | Эстетика | - глушитель должен отвечать требованиям технической эстетики: композиционной целостности формы, функциональной целесообразности формы, товарному виду;  - на стадии эскизного проекта необходимо выполнение вариантов общекомпоновочного художественно-конструкторского решения объекта разработки, поисковых макетов в произвольном масштабе;  - на стадии технического проектирования необходимо выполнение окончательного варианта художественно-конструкторского компоновочных чертежей макета объекта разработки;  - должен обеспечиваться удобный доступ к электрооборудованию и к возможности регулировки параметров и обслуживанию электроимпульсного глушителя;  - регулирующие элементы системы и датчики должны быть доступны водителям на их рабочем месте. |

6. Испытания и контроль качества:

- Предложить план испытаний для проверки соответствия образца конструкции электроимпульсного глушителя техническим требованиям;

- Определить критерии контроля качества на всех этапах производства.

7. Документация:

- Предоставить чертежи с размерами и техническими характеристиками.

- Составить технологическую карту производства.

- Предоставить руководство по эксплуатации, включая меры по обслуживанию.

8. Требования к патентной чистоте.

Электроимпульсный глушитель, предназначенный для очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, должен иметь патентную защиту в отношении следующих стран: Россия, Китай, Белоруссия.

Условия эксплуатации:

- Эффективная работа, надежность и долговечность электроимпульсного глушителя зависят от профессионализма обслуживающего персонала и соблюдения правил эксплуатации. Обслуживание должно проводиться квалифицированными операторами;

- Все компоненты глушителя должны сохранять работоспособность в диапазоне температур окружающей среды от -30° до +70° С и при влажности воздуха до 98%;

- Электроимпульсный глушитель должен регулярно проходить техническое обслуживание. Частота обслуживания должна соответствовать графику технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей.

4.7 Техническое задание на проектирование опытной конструкции ультразвукового глушителя

1. Общие сведения:

Наименование проекта: проектирование опытной конструкции ультразвукового глушителя для системы очистки выхлопных газов бензиновых двигателей автомобиля*.*

Область применения: Опытная конструкция ультразвкукового глушителя предназначена для улучшения эффективности очистки выхлопных газов и повышения общей экологичности бензиновых автомобилей.

2. Цель и назначение разработки

Целью создаваемой опытной конструкцииультразвукового глушителя является снижение вредных выбросов выхлопного газа в атмосферу в процессе эксплуатации бензиновых автомобилей.

3. Источники разработки: (*Статьи/патенты*) (таблица 4.13)

Таблица 4.13 – Технические требования

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Название статьи | Страна, наименование журнала  и выходные данные,  наукометрические показатели | Авторы |
| 1 | Comparison of the Efficiency of Cleaning the Exhaust Gas of Internal Combustion Engines of Cars with Ultrasonic Emitters | Журнал «Труды университета», Караганда: НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова». 2023, №3 (92), C.284-290. DOI 10.52209/1609-1825\_2023\_3\_284 | Sarsembekov B.K.,  Sinelnikov K.A.,  Suyunbaev Sh.M.  Kukesheva A.B.,  Dyusenbaev E.Sh. |
| 2 | Development of a methodology for experimental studies to determine the optimal operating modes of an ultrasonic muffler. | Вестник КазАТК, 124(1), 75–84. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-124-1-75-84 | Kukesheva A.B.  Kadyrov A.S.,  Suyunbaev Sh.M., Sinelnikov K.A.,  Pak I.A. |
| 3 | Establishment of the Reynolds Criterion for Ultrasonic Cleaning of Exhaust Gases of Internal Combustion Engines | Журнал «Труды университета», Караганда: КарТУ, 2022, №1 (85), C.175-179 | Suyunbayev Sh. M.,  Sarsembekov B.K.,  Suleyev B.D.,  Kukesheva A.B. |

4. Технические требования (таблица 4.14)

Таблица 4.14 – Технические требования

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Категория | Требования |
| 1 | Производительность | - улучшить эффективность снижения вредных веществ отработавших газов и снизить уровень дымности газов не более чем на 0,5 м-1 (39%). |

Продолжение таблицы 4.14

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Категория | Требования |
| 2 | Ультразвуковая система | - разработать систему ультразвуковой очистки, которая обеспечивает эффективное воздействие на вредные частицы газа;  - работа ультразвуковой системы не должна оказывать большую нагрузку на двигатель и не отнимать значительную часть его мощности;  - установить оптимальное значение частоты ультразвука, обеспечивающее эффективную очистку газа в зависимости от изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя; |
| 3 | Материалы | - конструкция ультразвукового глушителя должна быть изготовлена из материала, уменьшающая вибрации от ультразвука;  -материал должен быть устойчив к коррозии и высоким температурам. |
| 4 | Геометрия и размеры | -конструкция ультразвукового глушителя должна быть спроектирована с учетом габаритов автомобиля;  - задать оптимальные размеры (длина и диаметр) глушителя. |
| 5 | Прочность и долговечность | - конструкция ультразвуковой системы очистки должна выдерживать все нагрузки;  - термическая стойкость: работа в диапазоне температур от 300 до 1000 |
| 6 | Монтаж | - конструкция ультразвукового глушителя должна быть легко устанавливаемой на автомобиль;  - необходимо предусмотреть крепления и уплотнения для надежной фиксации конструкции системы и предотвращения утечек. |

5. Требования к проектированию (таблица 4.15)

Таблица 4.15 – Требования к проектированию

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Категория | Требования |
| 1 | Аэродинамические характеристики | предотвращение максимального сопротивления потока газов в глушителе |
| 2 | Ультразвуковая система | - разработать ультразвуковую систему глушителя, которая обеспечивает оптимальную работу электронного блока управления, регулирующая подачу частоты ультразвука;  -обеспечить своевременное подключение ультразвукового излучателя на нужную частоту при различных значениях угловой скорости двигателя. |
| 3 | Защитные меры | - предусмотреть защитные элементы для предотвращения повреждений ультразвукового глушителя при эксплуатации;  - учесть вибрации и удары, характерные для различных условий движения автомобиля. |
| 4 | Эстетика | - глушитель должен отвечать требованиям технической эстетики: композиционной целостности формы, функциональной целесообразности формы, товарному виду; |

Продолжение таблицы 4.15

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Категория | Требования |
| 4 | Эстетика | - на стадии эскизного проекта необходимо выполнение вариантов общекомпоновочного художественно-конструкторского решения объекта разработки, поисковых макетов в произвольном масштабе;  - на стадии технического проекта необходимо выполнение решения окончательного варианта художественно-конструкторского компоновочных чертежей макета объекта разработки, пояснительной записки;  - глушитель должен отвечать требованиям технической эстетики: композиционной целостности формы, функциональной целесообразности формы, товарному виду;  - на стадии эскизного проекта необходимо выполнение вариантов общекомпоновочного художественно-конструкторского решения объекта разработки, поисковых макетов в произвольном масштабе;  - на стадии технического проекта необходимо выполнение решения окончательного варианта художественно-конструкторского компоновочных чертежей макета объекта разработки, пояснительной записки;  - должен обеспечиваться удобный доступ к ультразвуковому оборудованию, регулировке параметров и обслуживанию ультразвукового глушителя;  - регулирующие элементы системы и датчики должны быть доступны водителям на их рабочем месте. |

6. Испытания и контроль качества:

- Предложить план испытаний для проверки соответствия образца конструкции ультразвукового глушителя техническим требованиям;

- Определить критерии контроля качества на всех этапах производства.

7. Документация:

- Предоставить чертежи с размерами и техническими характеристиками.

- Составить технологическую карту производства.

- Предоставить руководство по эксплуатации, включая меры по обслуживанию.

8. Требования к патентной чистоте.

Ультразвуковой глушитель, применяемый для очистки выхлопных газов бензиновых двигателей автомобилей, должен иметь охрану патента в следующих странах: Россия, Китай, Белоруссия.

Условия эксплуатации:

- Эффективность работы глушителя, его надежность и долговечность напрямую зависят от уровня квалификации обслуживающего персонала и соблюдения правил эксплуатации. Обслуживание глушителя должно проводиться квалифицированными операторами;

Все элементы глушителя должны быть работоспособны при температуре окружающей среды от -30° до +70° С, при влажности воздуха до 98% ;

- Ультразвуковой глушитель должен регулярно проходить техническое обслуживание. Частота обслуживания должна соответствовать графику технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей.

4.8 Рекомендации по разработке опытного образца и регулировке режима работы электроимпульсного глушителя

На основе предъявленных в техническом задании требований для образца электроимпульсного глушителя был разработан ряд рекомендаций по его конструированию.

Согласно представленной методике расчета конструкции образца электроимпульсного глушителя были установлены его основные геометрические параметры. К примеру, оптимальный диаметр глушителя не должен превышать 0,27 м, а оптимальная длина – 0,32 м.

Также согласно разработанной методике расчета было установлено оптимальное расстояние между электродами, которое в зависимости от изменения числа оборотов (угловой скорости) коленчатого вала двигателя составляет следующие значения: для 750 об/ мин (78,5 рад/с) – 0,008м; для 1280 об/мин (130,9 рад/с) – 0,004 м; для 4500 об/мин (471 рад/с) – 0,002 м.

Следует отметить, что во время проведения экспериментальных исследований на полноразмерных стендах электроимпульсного глушителя были замечаны следуюшие явления:

- проволочные электроды быстро подвергаются выгоранию;

- возникновение пробоя разряда на металлическом корпусе стенда глушителя.

Выгорание электродов объясняется следующим образом. В процессе работы электроды подвергаются электроэрозии. Это явление, при котором материал электрода постепенно изнашивается под действием высокочастотных электрических импульсов. Кроме того в зависимости от частоты и амплитуды электрических импульсов, генерируемых глушителем, возникают значительные термические эффекты. В совокупности всё это приводит к повышению температуры вокруг электродов и, как следствие, к их выгоранию.

Пробой разряда на металлический корпус глушителя возникает также с увеличением частоты электроимпульса. При высоких частотах электроимпульса возникают термические эффекты, сопровождающиеся увеличением температуры и влажности во внутреннем пространстве глушителя, что приводит к повышению вероятности разрядов пробивать изоляцию и переходить на металлические поверхности.

В связи с этим нами рекомендуется использовать автомобильные свечи вместо электродов. Это решение обусловлено согласно следующим характеристикам автомобильных свечей:

- автомобильные свечи обычно имеют простую конструкцию, что позволяет легко ими управлять. Их можно без труда включить и отключить, что очень важно при разработке электроимпульсной системы для предлагаемого образца глушителя;

- они предназначены для работы в различных условиях, включая переменные температуры, влажность и давление.

- автомобильные свечи обычно создают стабильный и надежный разряд, что очень важно для формирования коронного разряда.

- они доступны и недороги, не требуются большие денежные затраты на разработку предлагаемого образца электроимпульсного глушителя.

- Их использование в нескольких экземплярах увеличивает эффект проводимых с ними воздействий.

Таким образом использование нескольких пар автомобильных свечей в глушителе позволяет создать эффективную систему электроимпульсной очистки газа. Следовательно с целью повышения производительности очистки газа во внутренний корпус глушителя предлагается размещать от двух до шести свечей зажигания с разными значениями расстояния между электродами, которые позволять охватывать весь поток газа с учетом изменения угловой скорости вращения двигателя.

Также нами предлагается изготовление корпуса глушителя из диэлектрического материала. Это решение основывается на следующих причинах:

- диэлектрические материалы обладают хорошей изоляционной способностью, что помогает предотвратить утечку тока и обеспечить безопасность в работе глушителя. Использование диэлектрика позволяет избежать электрического контакта с внешней средой.

- диэлектрические материалы отличаются своей термической устойчивостью, что важно для устройств глушителя, работающих в условиях повышенной температуры.

- диэлектрические материалы, обычно, обладают низкой электрической проводимостью, что снижает электрические потери в корпусе. Это важно для сохранения высокой эффективности работы глушителя.

Следовательно учитывая выше перечисленные причины изготовление корпуса электроимпульсного глушителя из диэлектрического материала считается целесообразным.

Также, на основе полученного уравнению регрессии описывающее изменение соотношение показателей дымности газа (показателей критерия оптмиальности) в зависимости от соотношения частоты электроимпульса у угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя и расстоянию между электродами было установлено оптимальное значение частоты электроимпульса: при 78,5 рад/с – 230,44 Гц, при 130,9 рад/с – 204,29 Гц и при 471 рад/с 465,75 Гц.

Общекомпоновочное художественно-конструкторское решение электроимпульсного глушителя представлено на рисунке 4.5

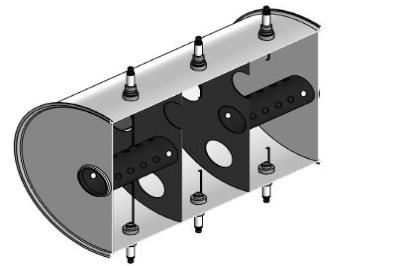


Рисунок 4.5 - Общекомпоновочное художественно-конструкторское решение электроимпульсного глушителя

Окончательный вариант художественно-конструкторского компоновочных чертежей электроимпульсного глушителя представлен в приложении Г диссертации.

4.9 Рекомендации по разработке опытного образца и регулировке работы ультразвукового глушителя

На основе требований, представленных в техническом задании для ультразвукового глушителя, были разработаны ряд рекомендаций по его конструированию. С учетом предложенной методики расчета и согласно результатам проведенных экспериментальных исследований были определены основные геометрические параметры образца, такие как оптимальный диаметр глушителя (не более 0,27 м) и оптимальная его длина (0,4 м) при которой фиксируются наивысшие показатели массы осажденных твердых частиц газа.

Для изготовления корпуса ультразвукового глушителя были рассмотрены следующие материалы:

- металлы, такие как сталь и алюминий, обладают высокой прочностью и выдерживают высокие температуры без деформации. Они также обладают хорошей стойкостью к коррозии. Однако металлические корпуса подвержены резонансам, что влияет на акустические характеристики ультразвука.

- Пластиковые материалы легче металлов, что может быть важно в уменьшении веса глушителя. Также некоторые полимеры устойчивы к химическим воздействиям и обеспечивают хорошие акустические характеристики. В целом, полимеры обладают более низкой прочностью по сравнению с металлами. Некоторые полимер деформируются при воздействии высоких температур.

- Композиты сочетают в себе прочность стекловолокна с легкостью пластиков. Однако изготовление композитов является более сложным процессом и дорогие в производстве.

На основе выше перечисленных характеристик каждого материала, с точки зрения прочности, стойкости к коррозии и к высоким температурам изготовление металлического корпуса глушителя считается целесообразным для ультразвукового глушителя. Однако также предлагается использование пластиковых материлов при разработке внутренней полости корпуса глушителя для обеспечения его бесшумной работы.

Также, на основе полученного уравнения регрессии описывающее изменение соотношение показателей дымности газа было установлено оптимальное значение частоты ультразвука в зависимости от изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя: при 78,5 рад/с – 13000 Гц при 272,63 рад/с – 460000 Гц и при 471 рад/с – 79 000 Гц.

Общекомпоновочное художественно-конструкторское решение ультразвукового глушителя представлено на рисунке 4.6

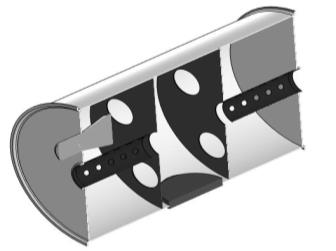


Рисунок 4.6 – Общекомпоновочное художественно-конструкторское решение ультразвукового глушителя

Окончательный вариант художественно-конструкторского компоновочных чертежей ультразвукового глушителя представлен в приложении Д диссертации.

Выводы по четвертому разделу.

- разработаны методики расчёта конструкции и определения режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей на основе полученных в диссертации критериев подобия и результатов экспериментальных исследований;

- по разработанной методикам расчета были определены опртимальные значения параметров конструкции и режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей. Также на основе полученных критериев подобия проведена оценка эффективности работы предлагаемых глушителей;

- на основе проведенного регрессионно-корелляционного анализа определено оптимальное соотношение между параметрами частоты электроимпульса, расстояния между электродами и угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя, при котором достигаются наименьшие значения показателя критерия оптимальности. Определены оптимальные значения частоты электроимпульса на разных значениях числа угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя и при оптимальных значениях расстояния между электродами;

- на основе проведенного регрессионно-корелляционного анализа определено оптимальное соотношение между параметрами частоты ультразвука и угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя, при котором достигаются наименьшие значения показателя критерия оптимальности. Определены оптимальные значения частоты ультразвука на разных значениях числа угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя;

- по показателю платы за выбросы проведена оценка экономического эффекта от внедрения электроимпульсных и ультразвуковых глушителей в систему очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания автомобиля. Результаты расчетов показатели значительное уменьшение плат за выбросы при внедрении электроимпульсного и ультразвукового глушителей в систему очистки выхлопных газов ДВС автомобилей;

- разработаны технические задания для проектирования промышленных образцов электроимпульсных и ультразвуковых глушителей для системы очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания автомобиля. Эти задания включает в себя требования к конструктивным и техническим характеристикам глушителей;

- разработаны рекомендации по разработке конструкции электроимпульсного и ультразвукового глушителей. В этих рекомендациях представлены геометрические размеры глушителя и оптимальные значения параметров, позволяющие регулировать их режимы работы в процессе очистки газа;

- перспективность исследования заключается в разработке глушителей и систем управления режимов для конкретной конструкции автомобилей траснпортных средств.

Заключение

Диссертация представляет новые, научно обоснованные результаты,направленные на решение важной прикладной задачи – разработку методики расчета конструкции и определение оптимального режима работы электроимпульсного и ультразвукового автомобильного глушителей. Эти глушители предназначены для снижения токсичности выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания в автомобильном транспорте. Заключение по результатам исследования:

- проведенный анализ конструкции автомобильных глушителей и систем очистки выхлопных газов, а также существующих исследований по снижению токсичности газов с использованием электроимпульсных и ультразвуковых методов обосновал цель и задачи исследования;

- описана физическая сущность процессов очистки выхлопных газов электрическим разрядом и ультразвуком, а также установлены параметры влиющие на эффективность коронного разряда и на процесс ультразвуковой коагуляции;

- обоснован критерий оптимальности работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей, который является соотношением показателей дымности газа после и до воздействия электроимпульсом или ультразвуком;

- методами теории подобия и анализа размерностей получены критерии подобия, описывающие конструкцию и оценивающие режим работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

- разработаны экспериментальные стенды и проведены экспериментальные исследования;

- по результатам экспериментальных исследований подтверждена эффективность очистки выхлопных газов с использованием электроимпульсных и ультразвуковых глушителей. Анализ экспериментальных исследований показал уменьшение показателей дымности газа после воздействия на газ ультразвуком (до 35%) и электроимпульсом (до 29%);

- результаты экспериментальных исследований и анализа теоретических зависимостей подтвердили гипотезу о возможности оптимизации процесса очистки выхлопных газов. Это достигается путем регулирования параметров, таких как расстояние между электродами и частота электроимпульса для электроимпульсного глушителя, а также частота ультразвука и угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя для ультразвукового глушителя;

- согласно сравнительному анализу полученных экспериментальных результатов на полноразмерных стендах электроимпульсного и ультразвукового глушителей установлены области их применения на бензиновых и дизельных двигателях автомобилей. Электроимпульсные глушители эффективны для снижения дымности дизельных двигателей, в то время как ультразвуковые глушители перспективны для очистки выхлопов бензиновых двигателей от твердых частиц;

- разработаны методики расчета оптимальных значений параметров, регулирующих работу электроимпульсного и ультразвукового глушителей и являющейся основой для их ппроектирования;

- получены оптимальные значения параметров расстояния между электродами (Δ) и частоты электроимпульса (*f*) в зависимости от изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя (ω) для электроимпульсного глушителя: при 79,5 рад/с (750 об/мин): Δ=0,008 м, *f* =23,04 Гц; при ω=130,9 рад/с (1280 об/мин) Δ=0,004 м, *f* =20,43 Гц; при ω=471 рад/с (4500 об/мин): Δ=0,0026 м, *f* =46,57 Гц;

- получены оптимальные значения частоты ультразвука (*f*) в зависимости от изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя для ультразвукового глушителя: при 79,5 рад/с (750 об/мин): *f* =13 кГц; при ω=272,63 рад/с (2600 об/мин) *f* =46 кГц; при ω=471 рад/с (4500 об/мин): *f* =79 кГц;

- определены оптимальные геометрические параметры конструкции электроимпульсного и ультразвукового глушителей: d=0,27 м и L=0,32 м – для электроимпульсного глушителя; d=0,27 м и L=0,4 м – для ультразвукового глушителя;

- проведены расчеты экономической эффективности от внедрения электроимпульсного и ультразвукового глушителей. Экономический эффект от внедрения электроимпульсного и ультразвукового глушителей на 151 000 автомобилей составляет 290 млрд тг и 116 млрд тг соответственно;

- разработаны технические задания с четрежами и рекомендации на проектирование для создания опытных конструкций электроимпульсного и ультразвукового автомобильных глушителей.

- перспективность исследования заключается в разработке глушителей и систем управления режимов для конкретной конструкции автомобилей траснпортных средств.

Список использованных источников

1. Шелмаков. С.В. Экологическая сертификация автотранспортных средств. – Москва: МАДИ, 2021. – 204 с.

2. Камерлохер В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 167 с.

3. Пепина Л.А., Созонтова А.Н. Загрязнение атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом // Alfabuild. – 2017. – №1 (1). С. 99-110.

4. Дульзон А.А. Парадокс устойчивого развития. – Изд-во. «Триумф», 2018 – 264 с.

5. Antonio Vittorino Gaddi, Fabio Capello. Clinical Handbook of Air Pollution-Related Diseases – Liverpool and Modena. Springer International Publishing AG, 2018. – 678 c.

6. Электронный ресурс: <https://www.iqair.com/ru/world-most-polluted-countries> ([Самые загрязненные страны мира в 2023 г. — Рейтинг по PM2.5 | IQAir](https://www.iqair.com/ru/world-most-polluted-countries))

7. Электронный ресурс: https://www.nur.kz/society/2016628-pochemu-v-gorodah-kazahstana-takoy-zagryaznennyy-vozduh-obyasnili-v-minekologii/?ysclid=luh95vcunp515016014 ([Из-за чего в казахстанских городах такой грязный воздух, объяснили в Минэкологии (nur.kz)](https://www.nur.kz/society/2016628-pochemu-v-gorodah-kazahstana-takoy-zagryaznennyy-vozduh-obyasnili-v-minekologii/?ysclid=luh95vcunp515016014)).

8. Электронный ресурс: https://www.iqair.com/ru/world-most-polluted-cities?continent=59af92b13e70001c1bd78e53&country=W3ctkwZj3TnwAZKaa&state=&sort=-rank&page=1&perPage=50&cities= ([Самые загрязненные города мира в 2023 году — Рейтинг по PM2.5 | IQAir](https://www.iqair.com/ru/world-most-polluted-cities?continent=59af92b13e70001c1bd78e53&country=W3ctkwZj3TnwAZKaa&state=&sort=-rank&page=1&perPage=50&cities=))

9. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Кадырова И.А., Аскаров Б.Ш. Результаты экспериментальных исследований работы емкостного оборудования ультразвуковой очистки отработавших газов автотранспорта // Уголь. – 2020. – № 2 (1127) – С.73-78. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-2-73-78>

10. [Kadyrov A.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218826977), [Sarsembekov B.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57247269800), [Ganyukov A.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194493653), [Zhunusbekova Z.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57222086933), [Alikarimov K.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57247056900) Experimental research of the coagulation process of exhaust gases under the influence of ultrasound // Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. – 2021. №23(4). С.288–298. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.4.B288-B298>

11. [Kadyrov A.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218826977), [Sarsembekov B.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57247269800), [Ganyukov A.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194493653), [Suyunbaev S.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221665892), [Sinelnikov K.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57794838700)Ultrasonic unit for reducing the toxicity of diesel vehicle exhaust gases. // Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. – 2022. №24(3). С.189–198. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2022.3.B189-B198>

12. [Kadyrov A.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218826977), [Kryuchkov Y.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58039466700), [Sinelnikov K.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57794838700), Ganyukov А., [Sakhapov, R.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56114495400), [Kukesheva, A.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57222089958) Studying the process of the internal combustion engine exhaust gas purification by an electric pulse. // Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. – 2022. №24(4). С.275–287. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2022.4.B275-B287>

13. Азаренко Е.И., Сигора Г.А., Гутник С.А., Гутник В.С., Ничкова Л.А., Хоменко Т.Ю. Обоснование перечня веществ, подлежащих контролю на постах мониторинга загрязнения атмосферного воздуха города Cевастополя. Экономика строительства и природопользования, 2022, 3 (84), pp. 52-60.

14. Телеш И.А., Кирвель П.И., Цявловская Н.В., Бобровничая М.А., Мельниченко Д. А., Рышкель О. С., Кукшинов М.С. (2017). Безопасность жизнедеятельности человека. В 3 ч. Ч. 1: Основы экологии и энергосбережения: учебно-методическое пособие.– Минск : БГУИР, 2017. – 94 с. : ил. ISBN 978-985-543-198-6 (ч. 1).

15. Абдыгали Е. Б., Сафаров Р. З. Смог и выхлопные газы по городу Алматы //Global Science and Innovations 3. Материалы Международной научной конференции. – 2018. – С. 63-67.

16. Малинин В. Н. Глобальный экологический кризис и климат //Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – №. 48. – С. 11-32.

17. Золотницкий В. А. Автомобильные газовые топливные системы //М.: АСТ: Астрель. – 2007. – 83 c.

18. Козлов А.В., Теренченко А.С., Васильев А.В. Анализ экологических требований" ЕВРО-6" к автомобильным двигателям. //Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – №. 3. – С. 40-46.

19. Прокопенко Е. А., Свистула А. Е. Ужесточение требований евростандарта на вредные выбросы мобильной техники //совершенствование быстроходных двигателей. – 2022. – С. 153-157.

20. Макаренко П. А., Агеева Е. В. Выхлопная система автомобиля //Молодежь и наука: шаг к успеху. – 2022. – С. 276-280.

21. Шкондин Д. М., Кузнецова Л. П. Принцип работы системы выпуска отработавших газов //И66 МЛ-07. – 2023. – С. 326.

22. Евченко А.В., Гапеев А.А., Усков С.В., Попеков А.В., Раабе, Д.С. О работе выпускной системы двигателя внутреннего сгорания. //Современное научное знание в условиях системных изменений. – 2022. – С. 34-38.

23. Фесик Е. В., Заражевский В. И., Мальчиков Г. Д. Ренийсодержащие катализаторы процессов нейтрализации выхлопных газов автомобиля. III. Натурные (блочные) образцы каталитических автомобильных нейтрализаторов //Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56. – №. 11. – С. 107-110.

24. Соломин В.А., Шабанов А.В., Шабанов А.А., Килюшник В.М., Младенский А.В. К вопросу повышения эффективности работы каталитического нейтрализатора //Известия МГТУ МАМИ. – 2017. – №. 1. – С. 63-71.

25. Ковалёва М.А., Виниченко Т.Н., Лопатко А.В., Миронов С.А., Терболян Д.М. Сравнительная характеристика каталитических нейтрализаторов //Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков. – 2022. – С. 170-175.

26. Крюкова М. А., Казанцев И. С. Автомобильный катализатор и методы его работы //Научный альманах. – 2020. – №. 6-2. – С. 34-37.

27. Печеницина Н. А., Рашевский Р. Б., Ширинкина Е. С. Снижение токсичности выхлопных газов за счет процессов каталитической нейтрализации //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – №. 4. – С. 27-36.

28. Денисов А.Д., Широких Э.В., Козлов С.М. Обзор альтернативных видов топлив для дизелей //Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2020. – №. 13. – С. 14-24.

29. Chala G. T., Abd Aziz A. R., Hagos F. Y. Natural gas engine technologies: Challenges and energy sustainability issue //Energies. – 2018. – V. 11. – №. 11. – p. 2934.

30. Wilberforce T. et al. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars //International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42. – №. 40. – p. 25695-25734.

31. Kley F., Lerch C., Dallinger D. New business models for electric cars—A holistic approach //Energy policy. – 2011. – V. 39. – №. 6. – p. 3392-3403.

32. Sobirjonov A., Meliev V., Usmanov I. USING ALTERNATIVE ENERGIES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES //Web of Technology: Multidimensional Research Journal. – 2024. – V. 2. – №. 5. – p. 21-32.

33. Kumar M.V., Babu A.V., Reddy C.R., Pandian A., Bajaj M., Zawbaa H.M., Kamel S. Investigation of the combustion of exhaust gas recirculation in diesel engines with a particulate filter and selective catalytic reactor technologies for environmental gas reduction //Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – V. 40. – p. 102557.

34. Johnson T. V. Review of selective catalytic reduction (SCR) and related technologies for mobile applications //Urea-SCR technology for deNOx after treatment of diesel exhausts. – New York, NY : Springer New York, 2014. – p. 3-31.

35. Parmar G. R., Rao N. N. Emerging control technologies for volatile organic compounds //Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2008. – Vol. 39. – №. 1. – p. 41-78.

36. Maduna K., Tomasic V. Air pollution engineering //Physical Sciences Reviews. – 2017. – Vol. 2. – №. 12. – p. 20160122.

37. Akiyama, H., Sakugawa, T., Namihira, T., Takaki, K., Minamitani, Y., & Shimomura, N. Industrial applications of pulsed power technology //IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation. – 2007. – Vol. 14. – №. 5. – p. 1051-1064.

38. Wang Y., Hu J. Ultrasonic removal of coarse and fine droplets in air //Separation and Purification Technology. – 2015. – Vol. 153. – p. 156-161.

39. Newman J., Newman J. Electric Forces and Fields //Physics of the Life Sciences. – 2008. – p. 1-25.

40. Cahen D., Kahn A. Electron energetics at surfaces and interfaces: concepts and experiments //Advanced Materials. – 2003. – Vol. 15. – №. 4. – p. 271-277.

41. Алешкевич В.А. Электромагнетизм. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014 – c. 404 – ISBN 978-5-9221-1555-1.

42. Колесников Е.К., Яковлев А.Б. Аналитические исследования движения тел с переменным электрическим зарядом //Сильно неравновесные процессы в механике неоднородных сред. – 2018. – С. 227-240.

43. Zubarev R. A. Reactions of polypeptide ions with electrons in the gas phase //Mass spectrometry reviews. – 2003. – Vol. 22. – №. 1. – p. 57-77.

44. Simons J. Theoretical study of negative molecular ions //Annual Review of Physical Chemistry. – 2011. – Vol. 62. – p. 107-128.

45. Майоров С. А. О дрейфе ионов в газе во внешнем электрическом поле //Физика плазмы. – 2009. – Т. 35. – №. 9. – С. 869-880.

46. Tan K.C.D., Goh N.K., Chia L.S., Taber K.S. Ions and ionisation energy //Australian Journal of Education in Chemistry. – 2003. – Vol. 62. – p. 21-26.

47. Азриель В.М., Кабанов Д.Б., Колесникова Л.И., Русин Л.Ю. Динамика рекомбинации ионов в низкотемпературной плазме //Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2007. – №. 5. – С. 50-69.

48. Guggenheim E. A. The conceptions of electrical potential difference between two phases and the individual activities of ions //The Journal of Physical Chemistry. – 2002. – Vol. 33. – №. 6. – p. 842-849.

49. Ermilov A.N., Eroshenkov V.F., Novichkov D.N., Kovalenko Y.A., Sapronova T.Y. M., Korolev, S. V. E., Shumilin A.P. Experimental study of the domain of existence of intensive non-self-sustained discharge in crossed fields //High Temperature. – 2013. – Vol. 51. – p. 601-607.

50. Петров В. В. Движение электронов в однородном электрическом поле линейного ускорителя //Доклады независимых авторов. – Publisher DNA, 2009. – №. 13. С. 98-109.

51. Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Быстрые электроны в плотном газе //Труды ИОФАН. – 2007. – Т. 63. – С. 102-131.

52. Руднев А.Д. Заряженные частицы. электрон //European science. – 2021. – №. 6 (62). – С. 5-16.

53. Rees G. J., David J. P. R. Nonlocal impact ionization and avalanche multiplication //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43. – №. 24. – p. 243001.

54. Акишев Ю.С., Балакирев А.А., Каральник В.Б., Петряков А.В., Трушкин Н.И. Влияние разных процессов электронной эмиссии на сверхвысокую зарядку пылевой частицы в плазме пучком энергичных электронов //Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2019. – Т. 1. – №. 10. – С. 274-279.

55. Мольков С.И., Савин В.Н. Влияние процессов электронной эмиссии на заряд пылевых частиц в упорядоченных плазменно-пылевых структурах //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2013. – №. 1 (165). – С. 80-85.

56. Михайлова М. П., Иванов Э.В., Данилов Л.В., Калинина К.В., Яковлев Ю.П., Копьев П.С.  Излучательная рекомбинация и ударная ионизация в полупроводниковых наноструктурах (Обзор) //Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т. 54. – №. 12. – С. 1267-1288.

57. Wu S. Cheng W., Huang G., Wu F., Liu C., Liu X., Lu X. Positive streamer corona, single filament, transient glow, dc glow, spark, and their transitions in atmospheric air //Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25. – №. 12. p. 1-14.

58. Staack D. Farouk B., Gutsol A., Fridman A. Characterization of a dc atmospheric pressure normal glow discharge //Plasma Sources Science and Technology. – 2005. – Vol. 14. – №. 4. – p. 700.

59. Belenguer P. et al. Pulsed glow discharges for analytical applications //Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2009. – Т. 64. – №. 7. – С. 623-641.

60. Marcus R. K., Broekaert J. A. C. Glow discharge plasmas in analytical spectroscopy. – Chichester : Wiley, 2003. – p. 293-315.

61. Roth C. Ferron G.A., Karg E., Lentner B., Schumann G., Takenaka S., Heyder, J.  Generation of ultrafine particles by spark discharging //Aerosol Science and Technology. – 2004. – Vol. 38. – №. 3. – p. 228-235.

62. Hnatiuc B., Hnatiuc, E., Pellerin, S., Chapelle, J. Experimental analysis of a double-spark ignition system //Czechoslovak Journal of Physics. – 2006. – Т. 56. – №. 8. – С. 851-867.

63. Hirata Y., Fukushima, M., Sano, T., Ozaki, K., Ohji, T. Micro-arc discharge phenomena //Vacuum. – 2000. – Vol. 59. – №. 1. – p. 142-151.

64. Zhu J. Ehn A., Gao J., Kong C., Alden M., Salewski M., Li Z. Translational, rotational, vibrational and electron temperatures of a gliding arc discharge //Optics express. – 2017. – Vol. 25. – №. 17. – p. 20243-20257.

65. Indarto A., Choi J.W., Lee H., Song H.K. Effect of additive gases on methane conversion using gliding arc discharge //Energy. – 2006. – Vol. 31. – №. 14. – p. 2986-2995.

66. Benilov M. S. Understanding and modelling plasma–electrode interaction in high-pressure arc discharges: a review //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Vol. 41. – №. 14. – p. 144001.

67. Leger L., Moreau E., Artana G., Touchard G. Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined flat plate //Journal of Electrostatics. – 2001. – Т. 51. – С. 300-306.

68. Стишков Ю.К., Самусенко А.В., Ашихмин И.А. Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе //Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 12. – С. 1331-1345.4

69. Афанасьев С. Б. Лавренюк, Д. С., Петрушенко, И. Н., & Стишков, Ю. К.. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе //Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – №. 7. – С. 30.

70. Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Шутько Ю.В. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс //Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – №. 1. – С. 85-90.

71. Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко, В.Ф., Шитц Д.В. Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления //Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – №. 11. – С. 1009-1017.

72. Бородулин В. В., Усов А. Ф. Вопросы разработки электротехнического оборудования для электроимпульсных дезинтеграционных установок //Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Биологические науки. – 2010. – №. 6 (111). С. 91-99.

73. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Bochenkov A.S., Shalunov A.V. The limits of fine particle ultrasonic coagulation //Symmetry. – 2021. – Vol. 13. – №. 9. – p. 1607.

74. Hussein T., Hruska A., Dohanyosova P., Dzumbova L., Hemerka J., Kulmala M., Smolik, J. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber //Atmospheric Environment. – 2009. – Vol. 43. – №. 4. – p. 905-914.

75. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. Экспериментальное исследование коагуляции и осаждения аэрозоля в закрытой трубе в безударно-волновом режиме //Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т. 50. – №. 4. – С. 603-605.

76. Черемисин А. А., Кушнаренко А. В. Влияние фотофоретического взаимодействия на тепловую коагуляцию аэрозолей //Труды XI международной ФАМЭБ’2012 конференции. Под ред. Олега Воробьева.—Крас-ноярск: НИИППБ, СФУ, 2012.—423 с. – Красноярский государственный торгово-экономический институт, 2012. – С. 379.

77. Yaghouti M. R., Rezakhanlou F., Hammond A. Coagulation, diffusion and the continuous Smoluchowski equation //Stochastic processes and their applications. – 2009. – Vol. 119. – №. 9. – p. 3042-3080.

78. Veshchunov M. S., Tarasov V. I. Extension of the smoluchowski theory to transitions from dilute to dense regime of brownian coagulation: Triple collisions //Aerosol Science and Technology. – 2014. – Vol. 48. – №. 8. – p. 813-821.

79. Hammond, Alan. "Coagulation and diffusion: A probabilistic perspective on the Smoluchowski PDE." – 2017. – Vol. 14.– p. 255-288. ISSN: 1549-5787 DOI: 10.1214/15-PS263

80. Xie M., He Q. Solution of Smoluchowski coagulation equation for Brownian motion with TEMOM //Particuology. – 2022. – Vol. 70. – p. 64-71.

81. Карпов С.В., Семина П.Н. О коагуляции полидисперсных наноколлоидов металлов и условиях применимости теории мюллера смолуховского //Коллоидный журнал. – 2012. – Т. 74. – №. 3. – С. 319-319.

82. Zhao Y., Kato S., Zhao J. Numerical investigation of Brownian, gradient, and turbulent coagulation under moving vehicle conditions in an underground garage //Journal of Dispersion Science and Technology. – 2016. – Vol. 37. – №. 2. – p. 258-269.

83. Эпштейн С.И. Распределение частиц взвешенных веществ по размерам в процессе градиентной коагуляции //Экология и промышленность. – 2017. – №. 1. – С. 59-65.

84. Lee K. W., Kwon S.B. Aerosol Nanoparticles: Coagulation Theory //Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Seven Volume Set. – CRC Press, 2014. – p. 29-38.

85. Shopin V. M. Isolation of disperse carbon from aerosol flows //Russian Journal of General Chemistry. – 2007. – Vol. 77. – p. 2292-2300.

86. Harif T., Khai M., Adin A. Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics //Water research. – 2012. – Vol. 46. – №. 10. – p. 3177-3188.

87. Шаповалов В. А. Трехмерная численная модель конвективного облака с учётом электрических процессов и электрической коагуляции //Инновационные научные исследования: теория, методология, практика. – 2018. – С. 12-17.

88. Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Говоркова В. А. Численное моделирование броуновской коагуляции в условиях турбулентного перемешивания //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51. – №. 2. – С. 169-169.

89. Затевахин, М.А., Игнатьев А.А., Рамаросон, Р., Говоркова, В.А Численное исследование процесса коагуляции аэрозольных частиц в турбулентном пограничном слое атмосферы //Труды Главной геофизической обсерватории им. АИ Воейкова. – 2009. – №. 559. – С. 161-191.

90. Derevich I. V. Coagulation kernel of particles in a turbulent gas flow //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – №. 7-8. – p. 1368-1387.

91. Chen Y., Zheng, H., Truong, V. N., Xie, G., Liu, Q. Selective aggregation by ultrasonic standing waves through gas nuclei on the particle surface //Ultrasonics Sonochemistry. – 2020. – Vol. 63. – p. 104924.

92. Liou Y. S., Kang X. J., Tien W. H. Particle aggregation and flow patterns induced by ultrasonic standing wave and acoustic streaming: An experimental study by PIV and PTV //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2019. – Vol. 106. – p. 78-86.

93. Riera E., Gonzalez-Gomez I., Rodriguez G., Gallego-Juarez J.A. Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications //Power Ultrasonics. – 2023. – p. 861-886.

94. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Terentiev S.A. Influence of Acoustic Streams on the Efficiency of Ultrasonic Particle Agglomeration //Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – №. 2. – p. 559.

95. Кудряшова О. Б., Антонникова А. А., Титов С. С. Физико-математическая модель коагуляции микронных и субмикронных аэрозолей с учетом испарения и осаждения при ультразвуковом воздействии //Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20. – №. 3. – С. 389-392.

96. Губайдуллин Д. А. и др. Волновая динамика газовзвесей и отдельных частиц при резонансных колебаниях //Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59. – №. 3. – С. 443-466.

97. Дойников А. А. Нелинейная динамика дисперсных частиц в акустических полях. – 2012. C. 119- 131.

98. Крамер Т. А., Кларк М. М. Моделирование ортокинетической коагуляции в пространственно изменяющемся ламинарном потоке //Journal of colloid and partition science. – 2000. – Т. 227. – No 2. – С. 251-261.

99. Stechemesser H., Sonntag H. Coagulation kinetics //Coagulation and Flocculation. – CRC Press, 2005. – p. 89-152.

100. Barbot E., Moustier S., Bottero J. Y., Moulin P.  Coagulation and ultrafiltration: understanding of the key parameters of the hybrid process //Journal of membrane science. – 2008. – Vol. 325. – №. 2. – p. 520-527.

101. Duck F. A. Radiation pressure and acoustic streaming //Ultrasound in medicine. – CRC Press, 2020. – p. 39-56.

102. Humphrey V. F. Ultrasound and matter—Physical interactions //Progress in biophysics and molecular biology. – 2007. – Vol. 93. – №. 1-3. – p. 195-211.

103. Кочергин Д.А., Линдт Е.В. Преимущества и недостатки ультразвукового контроля //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1. – №. 12. – С. 430-432.

104. Николаев М. Ю., Есимов А. М., Леонов В. В. Электрофильтры: принцип работы и основные достоинства //Технические науки–от теории к практике. – 2014. – №. 41. – С. 59-65.

105. Литвинов А. Ю. Анализ существующих конструкций электрофильтров //Молодежь и научно-технический прогресс. – 2018. – С. 50-55.

106. Xu X., Gao X., Yan P., Zhu W., Zheng C., Wang Y., Cen, K. Particle migration and collection in a high-temperature electrostatic precipitator //Separation and Purification Technology. – 2015. – Vol. 143. – p. 184-191.

107. Parker K. R. Electrical operation of electrostatic precipitators. – IET, 2003. – №. 41. p. 265.

108. Skodras G. et al. Particulate removal via electrostatic precipitators—CFD simulation //Fuel Processing Technology. – 2006. – Vol. 87. – №. 7. – p. 623-631.

109. Mizuno A. Electrostatic precipitation //IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation. – 2000. – Vol. 7. – №. 5. – p. 615-624.

110. Санаев Ю. И. Обеспыливание газов электрофильтрами //Кондор-Эко, Семибратово. – 2009. C.163.

111. Adamiak K. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review //Journal of Electrostatics. – 2013. – Vol. 71. – №. 4. – p. 673-680.

112. Badran M., Mansour A. M. Evaluating performance indices of electrostatic precipitators //Energies. – 2022. – Vol. 15. – №. 18. – p. 6647.

113. Кочетов О. С. Конструктивные элементы циклонов «серии ЦН» с воздействием акустического поля // Результаты фундаментальных и инновационных исследований технических и физико-математических наук. – 2021. – С. 46-48.

114. Кочетов О.С. Акустическая система газопылеочистки воздушных выбросов. Патент РФ. 30.05.2018. Бюл. № 16.

115. Кочетов О.С., Кочетова М.О.,   
Кочетов С.С., Кочетов С.С. Вихревой пылеуловитель с акустическим распылителем жидкости. Патент РФ. 06.10.2008.

116. Белова Т.И., Гаврищук В.И., Агашков Е.М., Дмитровская Т.А. Промышленная экология. Исследования параметров удаления и очистки воздуха. Учебное пособие (Лабораторный практикум). Брянск.- Брянская ГСХА, 2014.-113с.

117. Дудышев В.Д., Завьялов С.Ю. Способ снижения токсичности выхлопных газов двигателя внутренного сгорания и устройство для его осуществления. Патент РФ. RU 2132471 C1. 27.06.1999.

118. Борисенко А.В. Установка для очистки газов. Патент РК. (19)KZ (13) А4 (11) 20151. № 20151. 15.10.2008.

119. Дудышев В.Д., Деженин В.И. Способ очистки выхлопных газов двигатея внутреннего сгорания. Патент СССР. SU 1404664 A1. 23.06.1988.

120. Красносельский А.М. Способ нейтрализации отработавших газов двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления. Патент СССР. SU 1470985 A1 07.04.1989.

121. Вольнов А.С., Герасимов Е.М., Третьяк Л.Н. Способ очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания и устройство для его реализации. Патент РФ. RU2563950C1. 27.09. 2015.

122. Тришкин И.Б., Стражев Н.П.,Мяснянкина М.Н. Устройство для очистки отработавших газов и снижения уровня шума двигателей внутреннего сгорания. Патент РФ. RU56964U1. 27.09.2006.

123. Пикулик Н.В., Чекалов Л.В., Санаев Ю.И., Гузаев В.А. Способ очистки газов от пыли и электрофильтр для его осуществления. Патент РФ. RU (11) 2 636 488(13) C2. 23.11.2017.

124. Савиных Ю.А., Логачев В.Г.,   
Логачев С.В., Васильева А.Ю. Устройство для очистки выхлопных автомобильных газов от частиц. Патент РФ. RU 2373409 C2. 20.11.2009.

125. Хмелев В.Н., Савин И.И., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Левин С.В., Хмелев С.С. Ультразвуковая колебательная система. Патент РФ. RU 2323788 C1. 10.05.2008.

126. Савиных Ю.А. Логачев В.Г., Логачев С.В., Васильева А.Ю. Способ очистки выхлопных автомобильных газов от частиц. Патент РФ. RU 2 364736 C2. 20.08.2008.

127. Пак И.А. Разработка методики расчета и конструкции устройства для утилизации отработавших газов городских автобусов. Диссертация на соискание ученой степени доктора философии PhD. Республика Казахстан Караганда, 2021.

128. Сарсембеков Б.К. Теоретическое и экспериментальное исследование работы ультразвукового автомобильного глушителя. Диссертация на соискание степени доктора философии PhD. Республика Казахстан Караганда, 2022.

129. Синельников К.А. Разработка и исследование способов технического обслуживания и эксплуатации автомобиля с применением ультразвука. Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD). Республика Казахстан Караганда, 2023.

130. Крючков Е.Ю. Теоретическое и экспериментальное обоснование конструкции и способа работы электроимпульсного автомобильного глушителя. Республика Казахстан Караганда, 2023.

131. Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Шутько Ю.В. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс //Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – №. 1. – С. 85-90.

132. Коровин А. А. Изучение коронного разряда //Научный альманах. – 2020. – №. 1-2. – С. 22-24.

133. Болтачев Г.Ш., Зубарев Н.М. Аналитическая модель коронного разряда с конического электрода в режиме насыщения //Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – №. 11. – С. 28-37.

134. Коновалов Г.М., Медведев Д. Д., Зайцев С.А., Заев И.А., Кириллов И. А., Борисов А.А., Потапкин Б.В. Влияние пространственной конфигурации коронного разряда на процесс инициирования детонации в газовых смесях //Химическая физика. – 2008. – Т. 27. – №. 12. – С. 33-39.

135. Гросу Ф. П., Болога А.М., Болога М.К., Моторин О.В. О зависимости характеристик коронного разряда от давления //Электронная обработка материалов. – 2015. – Т. 51. – №. 5. – С. 45-50.

136. Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М., Ниязалиев И.А., Токарев А.В. Характеристики коронного разряда с высокотемпературным коронирующим электродом //Физика плазмы. – 2011. – Т. 37. – №. 8. – С. 756-764.

137. Ильин Д.В., Потокин А.С., Климов А.А. Перспективы электроимпульсных технологий //Материалы VI конференции Ассоциации научных обществ Мурманской области, посвящённой Дню российской науки. – 2018. – С. 62-70.

138. Ватажин А. Б., Лихтер В. А., Шульгин В. И. Частотные и вольт-амперные характеристики коронного разряда в потоке газа //Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29. – №. 1. – С. 1-9.

139. Гузаев В.А., Троицкий А.А., Шастин С.Н. Реконструкция электрофильтров на базе современных технических решений //Экологический вестник России. – 2012. – Т. 47. – С. 7.

140. A. Kukesheva, A. Kadyrov, Ye. Kryuchkov. Establishing the parameters of the operation mode of the electric pulse automobile muffler // Original Scientific Paper. – 2024. – Vol. 22. № 1. – С. 89-99.

141. Rozvany G.I.N. Structural design via optimality criteria: the Prager approach to structural optimization. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 8. – p. 465.

142. Алекперов A., Новрузов A. Выбор критерий оптимальности в долгосрочном прогнозировании //Экономика и инновационные технологии. – 2018. – №. 6. – С. 274-290.

143. Цирлин А.М. Методы оптимизации для инженеров. // Монография. – М. Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 214 с.

144. Фесина М., Филин, Е. В., Старобинский, Р. Н., Малкин, И. В., & Горина, Л. Н. Глушитель шума выпуска отработавших газов двигателя внутреннего сгорания автотранспортного средства. – 2012.

145. Иванов И. В., Третьякова С. Ю. Каталитические нейтрализаторы в выхлопной системе автомобиля //Технический университет, 2012. – С. 228.

146. Серегин А. Н., Кириченко А. С. Определение платиновых металлов в отработанных автомобильных катализаторах//Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – №. 7-1. – С. 67-71.

147. Воронин А.Н., Савченко А.С. Многокритериальная оптимизация: системный подход // Кибернетика и системный анализ. — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 160–174.

148. Потетня К. М., Садов А. А., Шорохов П. Н. Способы контроля дымности дизельных двигателей //Научно-технический вестник: технические системы в АПК. – 2018. – №. 1 (1). – С. 33-37.

149. Дрозд С. Н., Кугейко М. М., Фираго В. А. Способ измерения дымности отработавших газов и устройство для его осуществления. Измерительная техника: Ежемесячный научно-технический журнал / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии М. – 2004 - №7 С. 56-59.

150. Блянкинштейн И. М., Асхабов А. М., Воеводин Е. С. Концепция измерения дымности отработавших газов дизелей //Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – №. 2. – С. 38-41.

151. Мамасолиева М. И. Способ определения дымности транспортных средств //Международный академический вестник. – 2016. – №. 2. – С. 8-11.

152. Фирсов А. Н., Журавская А. О методах теории подобия и размерности //Системный анализ в проектировании и управлении. – 2020. – Т. 24. – №. 2. – С. 121-131.

153. Sedov L.I. Similarity and dimensional methods in mechanics. – CRC press, 2018. – p. 78.

154. Джинчвелашвили Г.А. Решение задач прикладной механики с помощью методов теории подобия и анализа размерностей //Строительство: наука и образование. – 2016. – №. 2. – С. 45-51.

155. Зорич В. Математический анализ задач естествознания. – М:МЦНМО, – 2018. – С. 155.

156. Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

157. Rice J. A., Rice J. A. Mathematical statistics and data analysis. – Belmont, CA : Thomson/Brooks/Cole, 2007. – Т. 371. – p.685.

158. Моисеев Б. М. Физика и метафизика света //Фундаментальные проблемы естествознания и техники: труды Конгресса-2014. Ч. – 2014. – Т. 3. – С. 59-68.

159. Moosmuller H., Chakrabarty R. K., Arnott W. P. Aerosol light absorption and its measurement: A review //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2009. – Vol. 110. – №. 11. – p. 844-878.

160. Bond T.C., Bergstrom R.W. Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review //Aerosol science and technology. – 2006. – Vol. 40. – №. 1. – p. 27-67.

161. Bohren C. F., Huffman D. R. Absorption and scattering of light by small particles. – John Wiley & Sons, 2008. – p. 521.

162. Shi R., Conrad S. A. Correlation and regression analysis //Ann Allergy Asthma Immunol. – 2009. – Vol. 103. – №. 4. – p. 34-41.

163. Kumari K., Yadav S. Linear regression analysis study //Journal of the practice of Cardiovascular Sciences. – 2018. – Vol. 4. – №. 1. – p. 33-36.

164. Пятница-Горпинченко Н. К. Асбест и волокнистый канцерогенез //Довкілля та здоров’я. – 2014. – №. 1 (68). – С. 4-9.

165, Хмелев В.Н., Шалунов, А.В., Шалунова, К.В., Голых, Р.Н.. Комплексное исследование акустической коагуляции мелкодисперсного аэрозоля //Ползуновский вестник. – 2010. – №. 3. – С. 303-309.

166. Benes E.  Groschl, M., Nowotny, H., Trampler, F., Keijzer, T., Bohm, H., Delouvroy, C. Ultrasonic separation of suspended particles //2001 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No. 01CH37263). – IEEE, 2001. – Vol. 1. – p. 649-659.

167. Doinikov A. A. Acoustic radiation forces: Classical theory and recent advances //Recent Res. Dev. Acoust. – 2003. – Vol. 1. – p. 39-67.

168. Чекман И.С., Сыровая А.О., Андреева С.В., Макаров В.А. Аэрозоли – дисперсные системы: Монография/ - Х: «Цифрова друкарня №1», – 2013. – 100 с.

169. Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Доровских Р.С., Шалунова К.В., Нестеров В.А., Абрамов А.Д.. Повышение эффективности процесса коагуляции субмикронных частиц ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности //Вестник алтайской науки. – 2015. – №. 1. – С. 298-307.

170. Lipkens B., Ilinskii Y. A., Zabolotskaya E. A. Effect of particle-particle interactions on the acoustic radiation force in an ultrasonic standing wave //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2015. – Vol. 1685. – №. 1. p. 12-23.

171. Хмелев В.Н., Нестеров В.А., Сливин А.Н., Шалунов А.В., Нестеров А.А. Исследование процесса ультразвуковой коагуляции дисперсных частиц при реализации режима стоячей волны // Редакционная коллегия конференции. – 2019. – С. 68.

172. Кадыров А.С., Пак И.А., Кадыров И.А., Ганюков, А.А.. Физика процесса ультразвуковой коагуляции выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания автотранспортных средств //Вестник ПГУ. Серия Energy. – 2020. – №. 1. – С. 219.

173. Нестеров В.А. повышение эффективности инерционного газоочистного оборудования наложением ультразвуковых полей высокой интенсивности. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – 2014 Бийск. – 161 с.

174. Шалунова К. В. Повышение эффективности процесса коагуляции газодисперсных систем наложением ультразвуковых полей. – 2011 Бийск. – 155 с.

175. Бахранова М., Урманова Г. Изучение физических характеристик ультразвука //Перспективы развития медицины. – 2021. – Т. 1. – №. 1. – С. 173-173.

176. Sultanova S.A. Safarov J. E., Usenov A. B., Muminovaa D. Analysis of the design of ultrasonic electronic generators //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2176. – №. 1. – p. 1-7.

177. Khmelev V.N. Nesterov V.A., Shalunov A.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed systems //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1679. – №. 2. – p. 1-8.

178. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V. Radiators for forming of high-intensive ultrasonic vibrations in gaseous media //2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2018. – С. 1-6.

179. Бритенков А. К. Боголюбов Б. Н., Дерябин М. С., Фарфель, В.А. Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы //Труды МАИ. – 2019. – №. 105. – С. 3.

180. Маслов О.Н. Интерференционные модели волновых полей сосредоточенных электромагнитных излучателей //Антенны. – 2016. – №. 11. – С. 14-22.

181. Костенков В.А., Богатов К.В. акустические преобразователи //Концепция развития и эффективного использования научного потенциала общества. – 2020. – С. 51-52.

182. Кадеева О. Е., Полещук В. А., Пахомов В. А. Получение ультразвука с помощью магнитострикционного излучателя //Евразийское Научное Объединение. – 2018. – №. 1-1. – С. 16-18.

183. Гладилин А. В. Контроль акустического контакта пьезоэлектрических излучателей ультразвука с объектом воздействия //Исследовано в России. – 2000. – Т. 3. – С. 65-65.

184. Новиков А.А. Оценка влияния электроакустических параметров ультразвукового пьезоэлектрического излучателя продольного типа на его основные частотные характеристики //Омский научный вестник. – 2008. – №. 2 (68). – С. 96-102.

185. Богайчук Я. Э., Холявко В. Г. К вопросу о необходимости корректирования существующей методики взимания платы за выбросы вредных веществ с отработавшими газами автомобилей //Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях. – 2002. – С. 38-41.

Приложение А

Патентный обзор существующих конструкций, работающих на основе электроимпульсной и ультразвуковой методов очисток

Таблица 1 – Результаты патентного обзора

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номер патента | Название патента | Способ очистки | Схема |
| RU 2132471 C1 | Способ снижения токсичнос-ти выхлоп-ных газов двигателя внутренно-го сгорания и устройст-во для его осущест-вления | Очистка газа осуществляет-ся за счет обработки пламени горящих выхлопных газов не полностью сгоревшей топливовоз-душной смеси в выпускном коллекторе электричес-ким полем | 1 – двигатель; 2 – выпускной коллектор; 3 – специальные электроизолированные электроды; 4 – первый высоковольтный преобразователь напряжения; 5 – устройство управления; 6 – второй высоковольтный преобразователь напряжения; 7 - устройство управления; 8 – датчики токсичности выхлопных газов; 9 – датчики первичного тока; 10 – два идентичных логически-функциональных блока; 11 – впускной коллектор; 12 – бортовой источник электроэнергии [117]. |
| (19)KZ (13) А4 (11) 20151 | Установка для очистки газов | Очистка газа за счет пропускания потока газа между жидкостным осадительным заземленным электродом, образуемый потоком воды. | 1 – корпус с жидкостным осадительным электродом; 2 – устройство для подачи газа; 3 – электрод; 4 – иглы, установленные на внешней поверхности электрода; 5 – реакционная зона между концами игл и жидкостным осадительным электродом; 6 – патрубок подачи воздуха; 7 – кольцевой канал; 8 – патрубок подачи воды; 9 – пазы для создания вращательного движения потока воды; 10 – направляющие лопасти; 11 – пилоны; 12 – коллектор; 13 – отводящий патрубок [118]. |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номер патента | Название патента | Способ очистки | Схема |
| SU 1404664 A1 | Способ очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания | Очистка газа за счет обработки выхлопных газов электрическими импульсами высокого напряжения и подачи в них водяной аэрозили | 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – выхлопные газы; 3 – камера; 4 – блок тиристорного зажигания; 5, 6 – электроды; 7 – задающий генератор; 8 – впрыскиватель; 9 – аэрозоли; 10 – пластина; 11 – отстойная емкость; 12 – сетка [119]. |
| SU 1470985 A1 | Способ нейтрали-зации отработав-ших газов двигателя внутренне-го сгорания и устройст-во для его осуществ-ления | Очистка газа за счет обработки потока газов при помощи коронного разряда меж электродном промежутке | 1 – впускной патрубок; 2 – продольные ребра; 3 – передний рассекатель в виде цилиндра с коническим хвостиком; 4 – корпус; 5 – выпускной патрубок; 6 – продольные ребра; 7 – задний рассекатель в виде цилиндра с коническим хвостиком; 8 – проволочный коронирующий электрод; 9 – игольчатый коронирующий электрод [120]. |
| RU2563950C1 | Способ очистки выхлопных газов двигателя внутренне-го сгорания и устройст-во для его реализации | Очистка газа за счет в электри-ческого нагрева каталитически активного элемента, выполненного из проволочной сетки или спирали из неблагородного металла, нагрев которой осуществляют в режиме постоянства сопротивления. | 1 – патрубок; 2 – ресивер; 3 – сажевый фильтр кассетного типа 4 – камера нейтрализатора, 5 – каталитические элементы, 6 - электронагреваемые терморегуляторы; 7 – термопара; 8 – панели термоэлектрического генератора 9 – панели термоэлектрического холодильника, 10 – газоанализатор, 11 – сигнализатор обнаружения опасных концентраций любого компонента 12 – механизм смены сажевого фильтра [121]. |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номер патента | Название патента | Способ очистки | Схема |
| RU56964U1 | Устройство для очистки отработавших газов и снижения уровня шума двигателей внутреннего сгорания | Очистка газа от сажи за счет коронного разряда | 1, 13 – впускной и выпускной канал; 2 – замкнутый стальной корпус; 3,8 – зоны осаждения; 4 – диэлектрические втулки; 5 – источник высоковольтного питания; 6 – шайба; 7 – сажесборник; 9 – уплотнительная прокладка 10 – съемная крышка; 11 – диэлектрические пластины; 12 – болты; 14 – крышка; 16, 15 коронирующие и некоронирующий электроды; 17 – очистители сажи; 18 – направляющие; 19 – шток; 20 – планки; 21- пружина; 22- подвижный диск [122]. |
| RU (11) 2 636 488(13) C2 | Способ очистки газов от пыли и электро-фильтр для его осущест-вления | Способ очистки газов в электрофильтре, включающий синусоидальное движение пылегазового потока в электростати-ческом поле активной зоны электрофильтра, отличается тем, что пылегазовый поток сначала движется синусоидально, затем изменяет направление на круговое, проходит через зону коронного разряда, где частицы пыли получают максимальный электрический заряд. | Поток газа поступает в зону квазиоднородного электростатического поля, где происходит интенсивное осаждение частиц пыли. После этого пылегазовый поток циклично и последовательно изменяет направление своего кругового движения, возвращаясь к синусоидальному движению и проходя постадийно по всей длине канала электрофильтраи[123]. |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номер патента | Название патента | Способ очистки | Схема |
| RU 2373409 C2 | Устройство для очистки выхлопных автомо-бильных газов от частиц | Очистка газа осуществляется за счет создания стоячей звуковой волны, с последующей коагуляцией и осаждением частиц газа | 1-корпус; 2 – отверстия для выхода очищенного выхлопного газа от частиц; 3 – одностороннее упорное кольцо; 4 – цилиндрическая втулка волновода;  5 - отверстия в цилиндрической втулке, 6 - внутренняя полость кольцевого четвертьволнового резонатора, 7 - внутренняя полость цилиндрической втулки, в которой происходит коагуляция частиц; 8 – отражательная крышка с кольцевым пазом; 9 – поток газа; 10 – частицы газа; 11 – очищенный газ; 12 – шлам; 13 – коагулированные частицы; 14 – стоячие волны [124]. |
| RU 2323788 C1 | Ультразву-ковая колебательная система | Очистка газа осуществляется за счет устройства, обеспечивающего прием и излучение ультразву-ковых колебаний | 1 – рабочий излучающий элемент; 2 – отражательная частотнопонижающая накладка; 3 – рабочая частотнопонижающая накладка; 4 –пьезоэлектрический элемент [125]. |
| RU 2364736 C2 | Способ очистки выхлопных автомо-бильных газов от частиц | Очистка газа осуществляется за счет коагуляции частиц газового потока в стоячей звуковой волне | 1 – выхлопная труба; 2 – газовая ловушка: 3 – выходные окна для выхлопного газа; 4 – внутренняя полость воздуховода; 5 – распространение низкочастотных звуковых волн; 6 – частицы неполного сгорания бензина, 7 – кольцевой четвертьволновой резонатор (накопитель частиц), 8 – отражение газового потока от закрытого конца воздуховода [126]. |

Приложение Б

План и порядок проведения экспериментальных исследований на лабораторном стенде электроимпульсного глушителя

Таблица 2 – План эксперимента

|  |  |
| --- | --- |
| Этап | Операции |
| Первый этап  при *f*1=15 Гц и  =0,012 м | 1. Произвести замер освещенности емкости до наполнения его дымом |
| 2.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 3. Нагреть спираль источника дыма |
| 4.Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 5. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с. |
| 6. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 7.Установить частоту электроимпульса на *f*1=15 Гц и расстояние между электродами на =0,012 м |
| 8. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 9. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 сна каждом интервале 15 с . |
| 10. Выпустить дым из ёмкости |
| Второй этап  при *f*2=20 Гц и  =0,012 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*2=20 Гц и расстояние между электродами на =0,012 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Третий этап  при *f*3=21 Гц  и =0,012 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*3=21 Гц и расстояние между электродами на =0,012 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Четвертый этап  при *f*1=15 Гц и =0,015 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |

Продолжение таблицы 2

|  |  |
| --- | --- |
| Этап | Операции |
| Четвертый этап  при *f*1=15 Гц и =0,015 м | 6.Установить частоту электроимпульса на *f*1=15 Гц и расстояние между электродами на =0,015 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Пятый этап  при *f*2=20 Гц и  =0,015 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*2=20 Гц и расстояние между электродами на =0,015 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Шестой этап  при *f*3=21 Гц и  =0,015 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*3=21 Гц и расстояние между электродами на =0,015 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Седьмой этап  при *f*1=15 Гц и  =0,018 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*1=15 Гц и расстояние между электродами на =0,018 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Восьмой этап | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |

Продолжение таблицы 2

|  |  |
| --- | --- |
| Этап | Операции |
| Восьмой этап  при *f*2=20 Гц и =0,018 м | 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на f2=20 Гц и расстояние между электродами на ∆\_3=0,018 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Девятый этап  при *f*3=21 Гц  =0,018 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*3=21 Гц и расстояние между электродами на =0,018 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Десятый этап  при *f*1=15 Гц  =0,021 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*1=15 Гц и расстояние между электродами на =0,021 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Одинадцатый этап  при *f*2=20 Гц  =0,021 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*2=20 Гц и расстояние между электродами на =0,021 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
|  | 1. Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |

Продолжение таблицы 2

|  |  |
| --- | --- |
| Этап | Операции |
| Двенадцатый этап  при *f*3=21 Гц и  =0,021 м | 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*3=21 Гц и расстояние между электродами на =0,021 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Тринадцатый этап  при *f*1=15 Гц и  =0,024 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*1=15 Гц и расстояние между электродами на =0,024 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Четырнадцатый этап  при *f*2=20 Гц и  =0,024 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*2=20 Гц и расстояние между электродами на =0,024 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |
| Пятнадцатый этап  при *f*3=21 Гц и  =0,024 м | 1.Добавить каплю масла на нихромовую спираль источника дыма |
| 2. Нагреть спираль источника дыма |
| 3. Разместить источник дыма внутри ёмкости |
| 4. Заполнить емкость дымом в течении t1=15 с |
| 5. Произвести замер освещенности газа в емкости и установить ее значение. |
| 6.Установить частоту электроимпульса на *f*2=21 Гц и расстояние между электродами на =0,024 м |
| 7. Подать напряжение на электроды, расположенные друг против друга в катушке зажигания |
| 8. Фиксировать значения изменения освещенности газа в течении 60 с на каждом интервале 15 с . |
| 9. Выпустить дым из ёмкости |

Приложение В

Методика определения числа параллельных опытов для проведения экспериментальных исследований на стендах электроимпульсного и ультразвукового глушителей

Таблица 1 – Результаты расчета параллельных опытов для лабораторного стенда электроимпульсной очистки газов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № опыта | Освещенность, *E* лк | | | | |
| t0=0 с | t1=15 с | t2=30 с | t3=45 с | t4=60 с |
| 1 | 482 | 711 | 797 | 890 | 976 |
| 2 | 557 | 706 | 785 | 870 | 983 |
| 3 | 626 | 749 | 841 | 944 | 1058 |
| 4 | 626 | 852 | 988 | 1150 | 1410 |
| 5 | 535 | 670 | 755 | 870 | 985 |
| 6 | 443 | 639 | 732 | 824 | 931 |
| 7 | 862 | 1269 | 1483 | 1689 | 1981 |
| 8 | 493 | 694 | 819 | 940 | 1114 |
| 9 | 432 | 618 | 737 | 894 | 1121 |
| 10 | 475 | 736 | 984 | 1387 | 1831 |
| 11 | 407 | 681 | 879 | 1118 | 1286 |
| 12 | 424 | 636 | 862 | 1202 | 1630 |
| 13 | 506 | 954 | 1986 | 4624 | 7387 |
| 14 | 449 | 923 | 2015 | 4098 | 6705 |
| 15 | 624 | 1394 | 2669 | 5067 | 8078 |
| Ср ариф. знач. (мат. ожидание), Е | 529,4 | 815,46 | 1155,47 | 1771,13 | 2498,4 |
| Дисперсия, D | 13972,4 | 54460,7 | 359950 | 2224881 | 6578386 |
| Сред.квад.откл, | 118,20 | 233,36 | 599,958 | 1491,6 | 2564,84 |
| Коэфф.вар. W= | 0,22 | 0,28 | 0,51 | 0,84 | 1,02 |
| Коэфф.Стью t= | 1,76 | 1,76 | 1,76 | 1,76 | 1,76 |
| Погрешность ε= | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| **Δ** разность Kдоп/Kвар | 0,67 | 0,52 | 0,28 | 0,17 | 0,14 |
| **Число опытов** | **8** | **9** | **11** | **13** | **15** |
| Медиана | 493 | 711 | 862 | 1118 | 1286 |
| "+- t\*Ϭ/√n" | 53,71 | 106,05 | 272,63 | 677,82 | 1165,54 |
| Дов.инт. Мин. | 428,68 | 607,41 | 723,82 | 814,35 | 928,86 |
| Дов. инт. Мах. | 627,11 | 1412,51 | 2811,11 | 5217,96 | 8135,94 |

.

Таблица 2 – Результаты расчета параллельных опытов для полноразмерного стенда электроимпульсного глушителя

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Дымность газа, (%) | Без воздействия  электроимпульсом | С воздействием  электроимпульса |
| № |
| 1 | 50 | 45 |
| 2 | 40 | 34 |
| 3 | 39 | 29 |
| Ср ариф. знач. (мат. ожидание), Е | 43 | 36 |
| Дисперсия, D | 37 | 44,66 |
| Сред.квад.откл, | 6,08 | 6,68 |
| Коэфф.вар. W= | 0,14 | 0,18 |
| Коэфф.Стью t= | 1,88 | 1,88 |
| Погрешность ε= | 0,15 | 0,15 |
| **Число опытов** | **3** | **5** |
| Медиана | 40 | 34 |
| "+- t\*Ϭ/√n" | 6,602343018 | 7,25 |
| Дов.инт. Мин. | 36,39 | 28,74 |
| Дов. инт. Мах. | 49,60 | 43,25 |

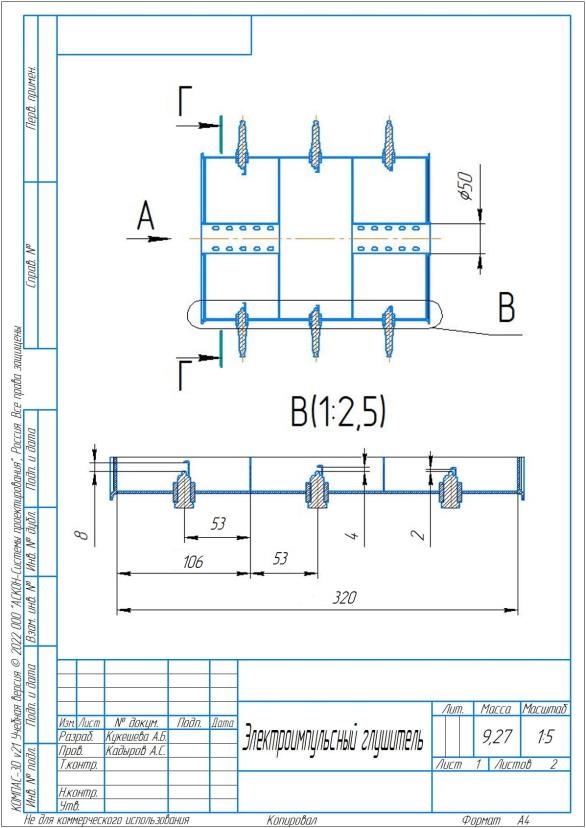
Таблица 3 – Результаты расчета параллельных опытов для полноразмерного стенда ультразвукового глушителя

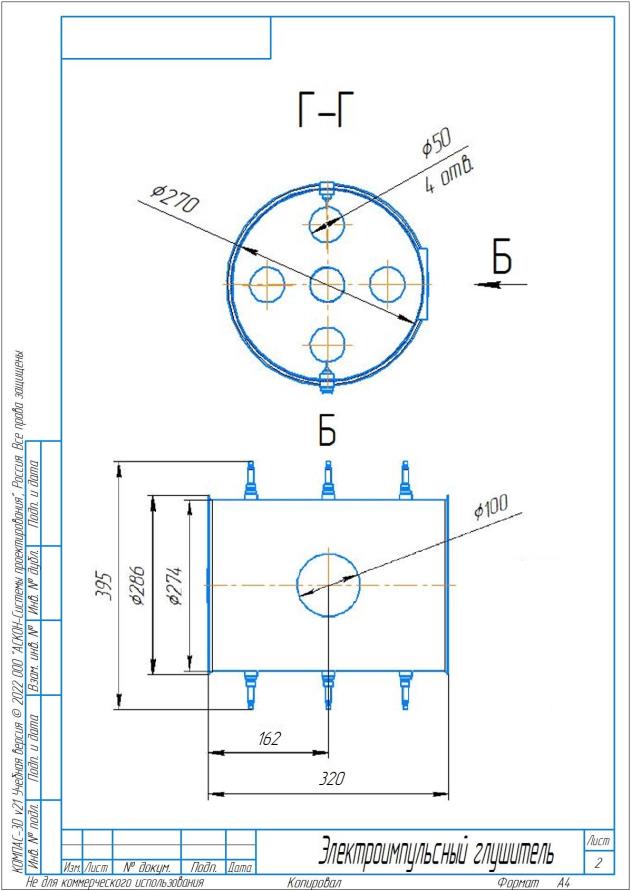
|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Дымность газа, (%) | Без воздейст-вия  ультразвука | С воздейст-вием  ультразвука | Без воздействия  ультразвука | С воздействием  ультразвука | Без воздействия  ультразвука | С воздействием  ультразвука |
| № |
| 1 | 50 | 45 | 50 | 45 | 50 | 45 |
| 2 | 40 | 34 | 40 | 34 | 40 | 34 |
| 3 | 39 | 29 | 39 | 29 | 39 | 29 |
| Ср ариф. знач. (мат. ожидание), Е | 36 | 32 | 47,6 | 44,3 | 49 | 45,6 |
| Дисперсия, D | 48 | 37 | 54 | 51 | 56 | 48 |
| Сред.квад.откл, | 6,92 | 6,08 | 7,34 | 7,14 | 7,48 | 6,92 |
| Коэфф.вар. W= | 0,19 | 0,19 | 0,15 | 0,16 | 0,15 | 0,19 |
| Коэфф.Стью t= | 2,02 | 2,02 | 2,02 | 2,02 | 2,02 | 2,02 |
| Погрешность ε= | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| **Число опытов** | **7** | **7** | **4** | **5** | **4** | **7** |
| Медиана | 40 | 35 | 48 | 44 | 49 | 40 |
| "+- t\*Ϭ/√n" | 8,08 | 7,09 | 8,57 | 8,32 | 8,72 | 8,08 |
| Дов.инт. Мин. | 27,92 | 24,9 | 39,09 | 29,00 | 39,27 | 27,92 |
| Дов. инт. Мах. | 44,08 | 45,09 | 56,23 | 52,66 | 57,72 | 45,08 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Художественно-конструкторско компоновочные чертежи

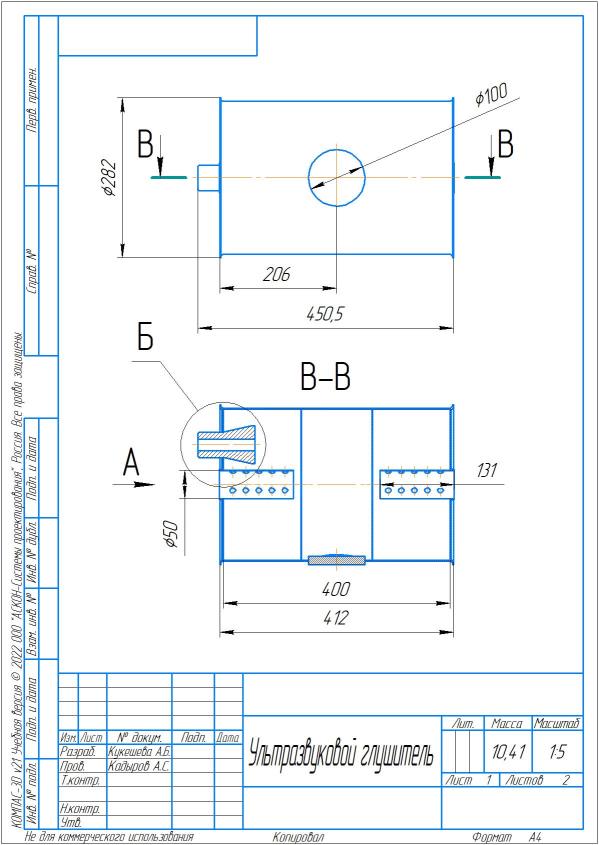
электроимпульсного глушителя

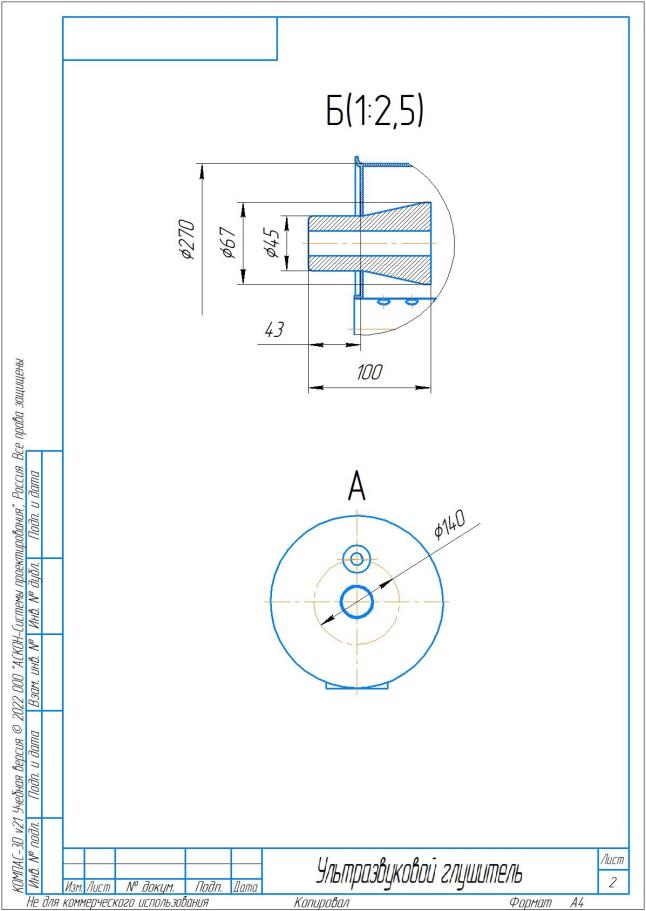




ПРИЛОЖЕНИЕ Д

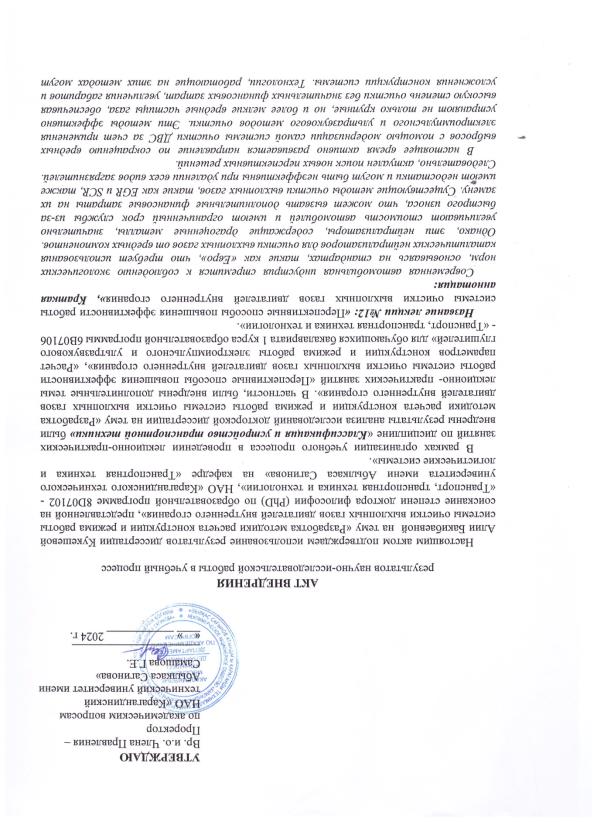
Художественно-конструкторско компоновочные чертежи ультразвукового глушителя

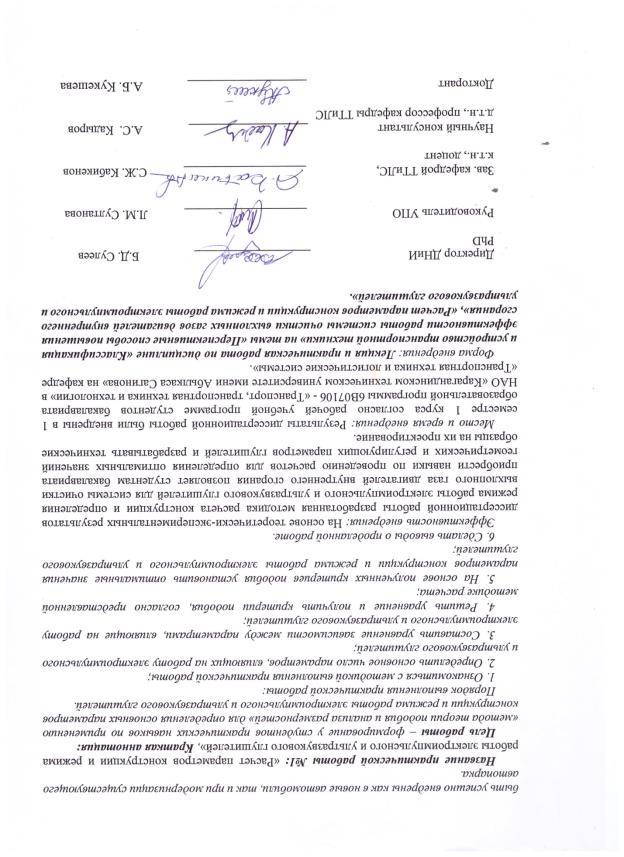




ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы





ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

в ТОО «ИНСТИТУТ ГРАДИЕНТ ПРОЕКТ»



ПРИЛОЖЕНИЕ З

Патент на полезную модель



ПРИЛОЖЕНИЕ И

Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом



