

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии PhD по направлению подготовки: 8D071 – «Инженерия и инженерное дело», образовательной программе: 8D07102 – «Транспорт, транспортная техника и технологии»

КУКЕШЕВА АЛИЯ БАКИБАЕВНА

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ И РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Актуальность диссертационной работы. Диссертация выполнена в соответствии с Государственной программой инфраструктурного развития Республики Казахстан «Нұрлы жол» на 2020-2025 годы.

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

Проблема загрязнения воздуха выхлопными газами остается актуальной не только во всем мире, но и в Казахстане, который занимает 40 место в мировом рейтинге «IQAir». 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. 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.

Для уменьшения загрязненности 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 улучшения 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 ионизации 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 подтверждается в ряде теоретических и экспериментальных исследований.

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 теории 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 диапазоны изменения параметров (числа оборотов двигателя, частоты ультразвука, расстояния между электродами, частоты электроимпульса и т.д.)
7. установлены области применения электроимпульсного и ультразвукового 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:

- подтверждена возможность 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 способности, 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, описывающие 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 диапазон изменения числа оборотов двигателя, расстояния между электродами и частоты электроимпульса для электроимпульсного глушителя и оптимальные диапазоны 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 подбора, описывающие работу электроимпульсного и ультразвукового глушителей;

3. Методику расчета показателей дымности газа по взаимосвязи с параметром коэффициента 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): $\Delta=0,008$ м, $f=23,04$ Гц; при $\omega=130,9$ рад/с (1280 об/мин) $\Delta=0,004$ м, $f=20,43$ Гц; при $\omega=471$ рад/с (4500 об/мин): $\Delta=0,0026$ 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 $\omega=272,63$ рад/с (2600 об/мин) $f=46$ кГц; при $\omega=471$ 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 6В07106 - «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.

Краткое содержание.

В первой главе диссертации проведен анализ существующих технологий и конструкций для системы очистки двигателя, альтернативные виды автомобилей и методы очистки газа, применяемых для уменьшения вредных выбросов выхлопных газов автомобилей. Рассмотрена физическая суть процесса очистки выхлопных газов с применением электричества, а также обоснована эффективность использования коронного разряда. Проанализированы физические аспекты очистки выхлопных газов ультразвуком, рассмотрены основные виды и теории коагуляции. Дано обоснование необходимости разработки конструкции и опеределения режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей. Поставлены цели и задачи исследования.

Во второй главе диссертации описан процесс очистки газа в электроимпульсном глушителе. Определены ключевые параметры, влияющие

на эффективность коронного разряда. Предложена новая конструкция спиралевидных электродов для улучшения воздействия на газовый поток. Выбран критерий оптимальности – соотношение дымности газа после и до воздействия электроимпульса. Разработаны безразмерные критерии, описывающие эффективность работы глушителя. Разработана методика экспериментов на лабораторных и полноразмерных стендах. Проведен анализ результатов эксперимента. Уровень очистки газа на лабораторном стенде достиг 40%. Определены значения регулирующих параметров (расстояние между электродами и частота электроимпульса), обеспечивающие оптимальную работу лабораторного стенда: $\Delta \approx 0,027$ и $f \approx 19$. На полноразмерном стенде показатель дымности снизился до 29%, а эффективность очистки газа составила около 30%. Установлены оптимальные значения параметров частоты и расстояния между электродами ($\Delta \approx 0,006$ и $f \approx 14$), предотвращающие переход в искровой разряд и обеспечивающие снижение дымности газа в полноразмерном стенде электроимпульсного глушителя.

В третьей главе диссертации изучен процесс очистки газа в ультразвуковом глушителе, выделены ключевые факторы, влияющие на движение частиц газа и эффективность коагуляции. Разработаны методики проведения экспериментов на полноразмерном стенде ультразвукового глушителя. По результатам экспериментального исследования на стенде глушителя подтверждено снижение дымности и увеличение очистки при изменении частоты ультразвука. Общая степень очистки газа ультразвуком в стенде глушителя составила 20-25%. Определено оптимальное соотношение частоты ультразвука и угловой скорости вращения двигателя ($f/\omega=402,01$). Установлены оптимальные значения частоты ультразвука (при максимальных значениях угловой скорости), позволяющие уменьшить дымность газа до 35%. Экспериментально определена оптимальная длина ультразвукового глушителя ($L=0,4$ м), обеспечивающая эффективное осаждение частиц газа.

В четвертой главе диссертации по оценке результатов экспериментальных исследований предоставлены обоснования и аргументы относительно целесообразности и применимости электроимпульсных и ультразвуковых глушителей на бензиновых и дизельных двигателях. Исследования показали, что электроимпульсные глушители эффективнее для снижения дымности выхлопов дизельных двигателей, в то время как ультразвуковые глушители перспективны для очистки газов от твердых частиц в выхлопах бензиновых двигателей. Также разработаны методики расчета и определения оптимального режима работы электроимпульсных и ультразвуковых глушителей, основанные на безразмерных критериях и экспериментальных данных. Произведена оценка экономического эффекта от внедрения этих глушителей на автомобили. Созданы технические задания для промышленных образцов глушителей, включая требования к их конструкции. Разработаны рекомендации по конструкции и регулировке режима работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей.

Личный вклад диссертанта. Автор лично выполнил исследование, включающие в себя обоснование критерия оптимальности работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей и расчет критериев подобия, оценивающий их работу. Участвовал в разработке экспериментальных стендов и совместно с участниками научной группы провел на них соответствующие экспериментальные исследования. Провел обработку результатов экспериментальных исследований, выполнил регрессионный-корреляционный анализ изменения соотношения показателей дымности газа в зависимости от соотношения параметров, влияющих на режим работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей. Вместе с научным руководителем разработал методики расчета конструкции, определения показателей дымности газа и оптимальных значений параметров, регулирующих режим работы электроимпульсного и ультразвукового глушителей. Также совместно с научным руководителем разработал методику расчета экономической эффективности от внедрения в эксплуатацию электроимпульсного и ультразвукового глушителей, техническое задание, эскизы и рекомендации на их проектирование.

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.

В статье «Establishing the parameters of the operation mode of the electric pulse automobile muffler» в журнале «Journal of Applied Engineering Science» входящий в базу Scopus, 3 квартиль, процентиль по Mechanical engineering 47, в Available online: <https://www.engineeringscience.rs/images/pdf/45196.pdf> автор провел экспериментальные исследования и рассчитал критерии подобия, позволяющие оценить эффективность работы предлагаемого электроимпульсного глушителя.

В статье «Development of calculation methodology for optimizing the operating mode of an electric pulse unit for cleaning exhaust gases» в журнале «KOMUNIKACIJE» входящий в базу Scopus, 3 квартиль, процентиль по Mechanical engineering 47, в разделе журнала «Mechanical engineering in Transport», Available online: <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.011> автор провел экспериментальные исследования и проанализировал полученные результаты.

В статье «Studying the process of the internal combustion engine exhaust gas purification by an electric pulse» в журнале «KOMUNIKACIJE» входящий в базу Scopus, 3 квартиль, процентиль по Mechanical engineering 38, в разделе журнала «Mechanical Engineering in Transport», <https://doi.org/10.26552/com.C.2022.4.B275-B287> Автор провел

экспериментальные исследования, проанализировал полученные результаты, а также разработал методику расчета параметров, оптимизирующие работу стенда и установок электроимпульсной очистки выхлопного газа.

В статье «Автокөліктің пайдаланылған газдарын электримпульсті бейтараптандыру процесін зерттеуге арналған эксперименттік қондырғыларды әзірлеу» в журнале «Труды Университета» ҚарТУ, раздел «Строительство.Транспорт» автор представил результаты предварительных исследований на разработанных стендах электроимпульсного глушителя по изменению концентрации кислорода в составе газа. Также совместно с авторами статьи разработал патент на полезную модель по способу очистки газа электроимпульсом.

В статье «Experimental determination on cleaning the exhaust gas of an automobile muffler by an electric pulse» в журнале «Вестник Евразийского национальный университет имени Л.Н. Гумилева, серия Технические науки и технологии» автор провел анализ существующих методов очистки газа и обосновал целесообразность применения электроимпульсного метода очистки для выхлопных газов автомобилей. Также провел регрессионно-корреляционный анализ изменения прозрачности газа в зависимости от изменения расстояния между электродами и сравнил эмпирические результаты с экспериментальными данными.

В статье «Establishment of Parameters of Electric Pulse Equipment Storage Device for Exhaust Gas Purification» в журнале «Труды Университета» ҚарТУ, раздел «Строительство.Транспорт» описал физику процесса электроимпульсной очистки выхлопных газов и разработал методику проведения экспериментальных исследований. Также участвовал в проведении экспериментальных исследований по получению зависимостей освещенности очищаемого газа от времени воздействия электроимпульса, частоты электроимпульса и расстояния между электродами, и провел анализ полученных результатов.

В статье «Study of the process of electric pulse cleaning of internal combustion engine exhaust gases» в журнале «Вестник КазАТК» , раздел «Транспорт, транспортная инженерия» автор составил методику проведения экспериментальных исследований на разработанном стенде электроимпульсного глушителя, а также провел анализ полученным результатам.

В статье «Development of a methodology for experimental studies to determine the optimal operating modes of an ultrasonic muffler» в журнале «Вестник КазАТК», раздел «Транспорт, транспортная инженерия» автор рассчитал критерии подобия, описывающие работу ультразвукового глушителя и разработал план и методику проведения экспериментальных исследований.

В статье «Comparison of the Efficiency of Cleaning the Exhaust Gas of Internal Combustion Engines of Cars with Ultrasonic Emitters» в журнале «Труды Университета» НАО ҚарТУ имени Абылжаса Сагинова, раздел «Строительство.Транспорт» автор описал физику процесса очистки газа

ультразвуком и составил методику проведения экспериментальных исследований на разработанном стенде ультразвукового глушителя, а также провел анализ полученных результатов.

В статье «Establishment of the Reynolds Criterion for Ultrasonic Cleaning of Exhaust Gases of Internal Combustion Engines» в журнале «Труды Университета» КарТУ, раздел «Строительство.Транспорт» автор рассчитал критерий Рейнольдса и другие критерии подобия, описывающие работу ультразвукового глушителя и на основе этого разработал план проведения экспериментальных исследований.

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.

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 влияющие 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 проектирования;

- 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): $\Delta=0,008$ м, $f=23,04$ Гц; при $\omega=130,9$ рад/с (1280 об/мин) $\Delta=0,004$ м, $f=20,43$ Гц; при $\omega=471$ рад/с (4500 об/мин): $\Delta=0,0026$ 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 $\omega=272,63$ рад/с (2600 об/мин) $f=46$ кГц; при $\omega=471$ 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 чертежами и рекомендации на проектирование для создания опытных конструкций электроимпульсного и ультразвукового автомобильных глушителей.