

НАО «Карагандинский технический университет»

УДК 629.02

На правах рукописи

ПАК ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ

**Разработка методики расчета и конструкции устройства для утилизации
отработавших газов городских автобусов**

6D071300 – Транспорт, транспортная техника и технологии

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии PhD**

Научные консультанты:

д.т.н., профессор

НАО «КарТУ»

Ибатов М.К.,

д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО

«МАДГТУ (МАДИ)»

Баурова Н.И.

Республика Казахстан

Караганда, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ..... | 4 |
| ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ..... | 5 |
| Введение..... | 6 |
| 1. Аналитический обзор и постановка цели и задач исследования..... | 9 |
| 1.1 Классификация конструкций и принципа работы автомобильных глушителей..... | 9 |
| 1.2 Анализ способов очистки и состава отработавших газов..... | 18 |
| 1.3. Анализ состава и типов используемых автобусов на примере г. Караганды..... | 29 |
| 1.4.Цели и задачи исследования..... | 42 |
| 2. Выбор и обоснование метода утилизации отработавших газов городского автотранспорта..... | 43 |
| 2.1. Сравнение вариантов очистки и утилизации отработавших газов..... | 43 |
| 2.2. Анализ процесса очистки ультразвуком..... | 47 |
| 2.2. Математическое моделирование процесса утилизации отработавших газов двигателя внутреннего сгорания..... | 56 |
| 2.3. Анализ математической модели процесса утилизации отработавших газов..... | 58 |
| 3. Экспериментальное исследование ультразвуковой коагуляции твердых частиц отработавших газов двигателей внутреннего сгорания..... | 63 |
| 3.1 Цель и задачи эксперимента..... | 63 |
| 3.2 Оборудование и измерительная аппаратура..... | 63 |
| 3.3 Определение числа опытов, план и методика эксперимента..... | 68 |
| 3.4 Обработка экспериментальных данных..... | 73 |
| 3.5 Анализ полученных результатов..... | 76 |
| 3.6. Сравнение полученных опытных данных с теоретическими..... | 94 |
| 4. Реализация результатов исследования..... | 98 |
| 4.1. Варианты конструкций систем утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания..... | 98 |
| 4.2 Конструктивные решения установки устройства ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов на примере автобуса..... | 105 |
| 4.3 Методика расчета системы утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания..... | 106 |
| 4.3 Расчет эколого-экономической эффективности устройств ультразвуковой очистки отработавших газов ДВС автотранспорта..... | 111 |
| 4.4. Разработка технического задания на проектирование опытной конструкции ультразвуковой системы очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов..... | 113 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 115 |
| Список использованных источников..... | 117 |

| | |
|--------------------|-----|
| Приложение А | 125 |
| Приложение Б..... | 130 |
| Приложение В | 137 |
| Приложение Г..... | 138 |

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертационной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны;
2. ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) Вибрационная безопасность Общие требования.
3. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
4. ГОСТ 12.1.001-89 “ССБТ. Ультразвук. Общие требования безопасности”
5. СанПиН № 1.01.002-94 "Санитарные правила организации технологических процессов и гигиенические требования к производственному оборудованию"

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
ОГ – отработавшие газы;
ВВ – вредные вещества;
 C_mH_n – углеводороды;
 NO_x – оксиды азота;
ПАН – гидронитрат пероксиацетила;
ПАУ – полициклические ароматические углеводороды;
ТЧ – твердые частицы;
ПДК – предельно допустимая концентрация;
АУ – активированный уголь;
АО – оксидные адсорбенты;
ВКУ – вращающееся контактное устройство

Введение

Развитие общества, научно-технический прогресс, неуклонный рост производства и потребления активно влияют на состояние окружающей природной среды на Земле. Транспортная техника вносит свой значительный вклад в загрязнение окружающей среды вредными компонентами выхлопных газов.

В крупных городах с большим транспортным потоком остро стоит вопрос загазованности выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания транспортных средств. В зоне автобусных остановок, на перекрестках, где наблюдается большое скопление транспортных средств общего пользования, происходит наиболее интенсивное загрязнение воздуха продуктами сгорания, и соответственно фиксируется наибольшая концентрация токсичных и загрязняющих компонентов отработавших газов, что негативно сказывается на здоровье людей. Значительная часть городских автобусов оснащены дизельными двигателями, основным токсичным компонентом выхлопных газов которого являются окислы азота и загрязняющим компонентом – сажа, содержащая канцерогенное вещество бензпирен [1]. Кроме того, твердые частицы сажи размером менее 2,5 мкм и особенно ультрадисперсные твердые частицы могут вызывать у людей не только бронхо-лёгочные, но и неврологические заболевания, включая мигрень, головную боль, церебросердечный инсульт, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона и другие формы деменции [2, 3, 4].

Наибольший выброс сажи происходит во время запуска, прогрева двигателя и при увеличении нагрузки на двигатель, например при трогании с места, разгоне, движении на подъем из-за поступления большего количества топлива, способствующего неравномерному микрораспределению его по объему камеры сгорания. Часть топлива сгорает сразу же после испарения с поверхности капель и повышает степень концентрации сажи в отработавших газах [5, 6 стр. 74].

Известен метод очистки газов промышленных предприятий коагуляцией взвешенных мелкодисперсных частиц за счет ультразвукового воздействия на среду, позволяющий также производить их утилизацию. Однако нет исследований и методики расчета, которые позволили бы применить этот метод для очистки и утилизации отработавших газов ДВС транспортных средств и в частности городских автобусов.

В связи с этим разработка устройства ультразвуковой очистки и утилизации выхлопных газов городских автобусов во время запуска, прогрева двигателя, остановок и троганья с места является актуальной задачей.

Целью исследования является установление зависимостей, позволяющих разработать методику расчета и конструкцию накопительного устройства ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов.

Для достижения цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Дать сравнительный анализ конструкции автомобильных глушителей;
2. Произвести анализ способов очистки и состава отработавших газов;
3. Выбор варианта очистки и утилизации отработавших газов городских автобусов;
4. Разработать и исследовать математическую модель процесса утилизации отработавших газов ДВС;
5. Разработать экспериментальное оборудование и подтвердить полученные аналитическим путем результаты;
6. Предложить конструкцию и разработать методику расчета системы утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов;

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- подтверждена возможность использования ультразвуковых глушителей с ёмкостной камерой для утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов;

- установлены зависимости коэффициента коагуляции для процессов осаждения твердых частиц отработавших газов в накопительной ёмкости устройства для утилизации отработавших газов городских автобусов с ультразвуковым воздействием и без него;

- впервые подтверждена гипотеза тесной корреляции между процессами укрупнения и седиментации частиц выхлопного газа и степенью его прозрачности в накопительной ёмкости устройства ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов;

- экспериментальным путём получены зависимости изменения светопропускной и светопоглощающей способности отработавшего газа от времени осаждения твердых частиц при воздействии ультразвука и без него, а также коэффициента коагуляции от времени осаждения твердых частиц в накопительной ёмкости устройства ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов;

- впервые получена зависимость скорости изменения коэффициента коагуляции твердых частиц от времени их осаждения в накопительной ёмкости устройства ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Ультразвуковое воздействие на выхлопные газы в замкнутой ёмкости ускоряет в 3 – 4 раза процессы гидродинамической коагуляции;
2. Математическая модель, основанная на кинетической теории газов, определяет величину массы сажи в зависимости от начальной массы газа, коэффициента коагуляции и времени воздействия;
3. Положение о взаимосвязи между коэффициентом коагуляции и степенью прозрачности газа в накопительной ёмкости устройства ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов;

Автор защищает:

1. Принципиальную схему и метод утилизации отработавших газов накопительным устройством ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов городских автобусов;
2. Разработанную математическую модель процесса утилизации отработавших газов и методы её исследования;
3. Предложенную конструкцию накопительного устройства для очистки и утилизации отработавших газов городских автобусов;
4. Методику расчета и техническое задание на проектирование опытной конструкции ультразвуковой системы очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов.

Объектом исследования является процесс очистки и утилизации отработавших газов ДВС.

Предметом исследования является устройство ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов городских автобусов.

Практическая полезность заключается в разработке методики расчета накопительного устройства для утилизации отработавших газов городских автобусов.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 19-ти научных работах, в том числе в 2-х статьях, входящей в базу данных Scopus, 3-х статьях, рекомендованных ККСОН, 1-ой статье, входящей в реферативную базу РИНЦ, 6-ти тезисах международных научно-практических конференций. Получено 2 патента на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права и 4 свидетельства о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом.

1. Аналитический обзор и постановка цели и задач исследования

1.1 Классификация конструкций и принципа работы автомобильных глушителей.

Под термином «глушитель» может пониматься как вся система, отвечающая за выпуск отработавших газов, так и его составная часть, в которой и происходит непосредственно снижение уровня шума. Каждая модель автомобиля имеет свои конструктивные особенности системы выпуска отработавших газов. В настоящее время функции глушителя не ограничиваются только снижением уровня шума. Они также выполняют не менее важные функции предотвращения попадания токсичных газов в салон автомобиля, снижение загрязнения окружающей среды вредными компонентами отработавших газов ДВС.

Существуют следующие основные направления снижения вредных выбросов отработавших газов ДВС:

- совершенствование методов воздействия на рабочий процесс двигателей транспорта с целью уменьшения токсичности отработавших газов;

- совершенствование методов, способов и средств снижения токсичности отработавших газов в системе их выпуска. [7, 8, 9, 10, 6 стр. 238]

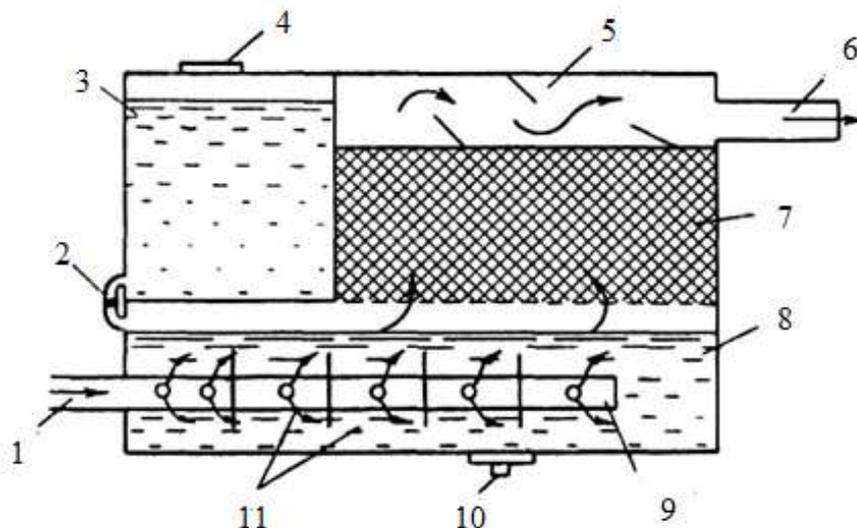
К методам воздействия на рабочий процесс двигателей, характеризующих первое направление, можно отнести такие, как учет влияния эксплуатационных факторов, рода применяемых топлив, его качества и присадок к ним, поддержание исправного технического состояния, регулировки рабочего процесса сгорания топлива в двигателе, рециркуляция отработавших газов и комбинированные методы снижения токсичности отработавших газов.

Ко второму направлению следует отнести широко распространённые методы очистки, основанные на пропускании отработавших газов через различные устройства в системе их выпуска. Эти устройства различают по принципу действия на задерживающие вредные компоненты отработавших газов устройства, называемые фильтрами, и устройства, оказывающее активное воздействие на вредные вещества, называемыми нейтрализаторами. В нейтрализаторах происходит дожигание продуктов неполного сгорания топлива, химическое преобразование вредных компонентов отработавших газов и т.д., в результате чего образуются вещества, не оказывающие негативное влияние на здоровье человека и окружающую среду. [7, 11, 12]

Применительно к транспортной технике распространение получили следующие методы очистки: жидкостная нейтрализация, нейтрализация, основанная на методах термического дожигания, термокаталических методах очистки [13, 14].

Исторически жидкостные аппараты являются первыми нейтрализаторами, применяемыми на транспортной технике. Применение

жидкостных нейтрализаторов было наиболее распространено в горнодобывающей промышленности. Ими оснащалось подземное самоходное оборудование для частичного обезвреживания отработавших газов. Проходя через воду или водный раствор химических реагентов, часть вредных веществ, содержащихся в выхлопном газе механически задерживаются в жидкости, выпадая в виде осадка, часть растворяется, а часть связывается химически. Одновременно происходит охлаждение отработавших газов. Схема жидкостного нейтрализатора показана на рисунке 1.1 [15 стр. 72].



1 – впуск газа; 2 – перепусковой кран; 3 – доливочный бак с водой объемом 45 л; 4 – доливочная горловина; 5 – водоотбойные щитки; 6 – выпуск газа; 7 – металлическая стружка; 8 – основной бак объемом 55 л; 9 – коллектор; 10 – сливная пробка; 11 – отсеки

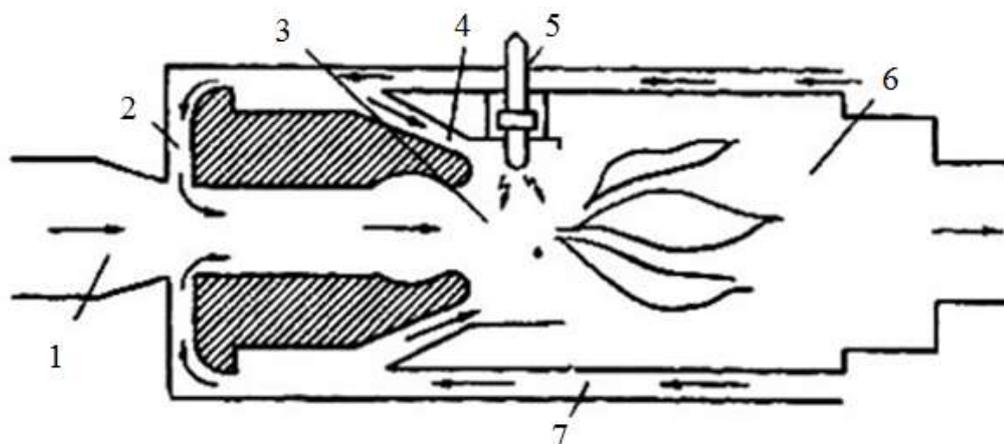
Рисунок 1.1 – Схема жидкостного нейтрализатора (конструкция Ленинградского горного института им. Плеханова) отработавших газов дизельного двигателя МАЗ-205

Принцип работы аппаратов термической нейтрализации основан на дожигании продуктов неполного сгорания, вредных горючих компонентов отработавших газов ДВС в условиях высокой температуры и наличия достаточного количества кислорода в отработавшем газе. Этим методом снижается содержание таких горючих токсичных компонентов, как СО, альдегиды, C_mH_n и др. Однако, этим методом невозможно нейтрализовать токсичные окислы азота NO_x , содержание которых, особенно в дизельных ДВС, достаточно высокое.

Схема пламенного нейтрализатора приведена на рисунке 1.2. [15 стр. 74]

Отработавшие газы 1 поступают в дожигатель 3, имеющий два эжектора, через которые поступает первичный 2 и вторичный 4 воздух,

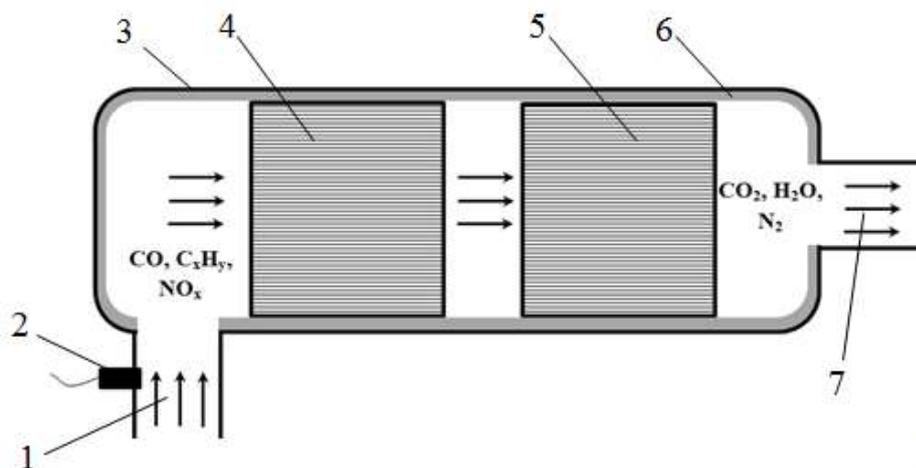
подогретый в теплообменнике 7. Горение происходит в камере 6, для воспламенения служит свеча 5.



1 – отработавшие газы; 2 – первичный воздух; 3 – дожигатель;
4 – вторичный воздух; 6 – камера; 7 – теплообменник

Рисунок 1.2 – Схема пламенного нейтрализатора отработавших газов карбюраторного двигателя

В настоящее время широко распространены аппараты, работающие на основе метода каталитической нейтрализации отработавших газов. Устройства заполнены катализатором химических реакций (рисунок 1.3), в присутствии которых продукты неполного сгорания окисляются до конечных нетоксичных окислов.



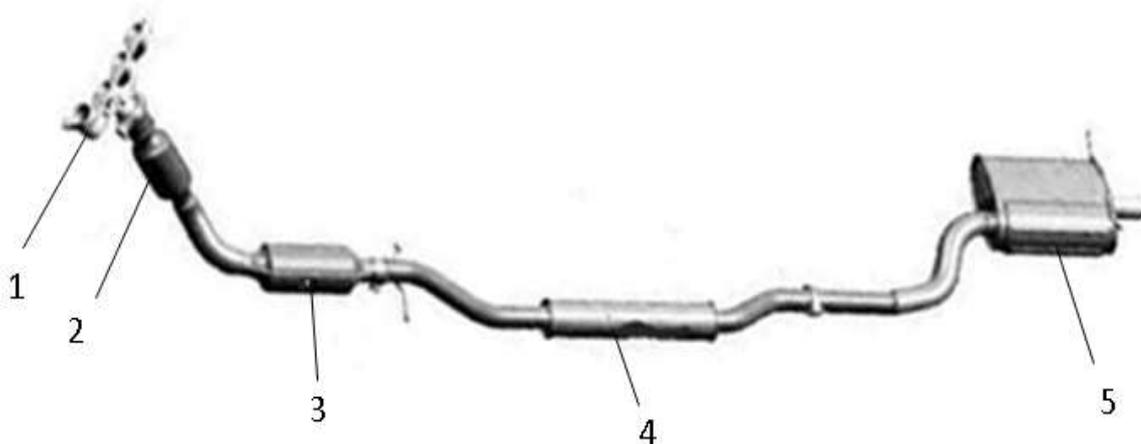
1 – отработавший газ; 2 – датчик замера состава отработавших газов;
3 – нержавеющая оболочка; 4, 5 – керамическая подложка с каталитическим
слоем; 6 – мягкий изолятор; 7 – нейтрализованный газ

Рисунок 1.3 – Схема каталитического нейтрализатора отработавших газов бензинового двигателя

Слой каталитического вещества (соли платины, родия, палладия и др.) наносится на носитель в виде керамической вставки в виде сот, либо на металлическую ленту. Чаще используются катализаторы в виде керамической вставки, так как они дешевле, но в силу своей хрупкости и соответственно чувствительности к ударным нагрузкам, в конечном счете, их эксплуатация может обойтись дороже. К разрушению керамического носителя могут привести случайные ударные нагрузки, взрывы топливо-воздушной смеси, скапливающейся перед катализатором при неправильно отрегулированной системе впрыска топлива. Катализатор с металлическим блоком дороже, но отличается надёжностью и устойчивостью к различным механическим нагрузкам [16, 17, 18, 19].

Так как существует прямая зависимость эффективности процессов каталитической нейтрализации скорости прогрева нейтрализатора до рабочей температуры, каталитический нейтрализатор на современных автомобилях располагают как можно ближе к выпускному коллектору или в самом коллекторе. Чем ближе каталитический нейтрализатор находится к камере сгорания, тем быстрее он прогревается до рабочей температуры и лучше сохраняется от внешних воздействий и резких температурных перепадов.

Пример схемы расположения каталитических нейтрализаторов приведен на рисунке 1.4.



1 – коллектор; 2 – катализатор; 3 – второй катализатор;
4 – резонатор; 5 – глушитель

Рисунок 1.4 Схема расположения каталитических нейтрализаторов
(катализаторов)

Отработавший газ из коллектора 1 поступает в катализатор 2, где происходит первичная нейтрализация отработавших газов. В связи с тем, что первый катализатор расположен в непосредственной близости к коллектору, более высокая температура газов способствует быстрому прогреву катализатора до рабочей температуры и более эффективной нейтрализации вредных компонентов отработавших газов. Во втором катализаторе процессы нейтрализации продолжают и очищенный отработавший газ поступает в

систему шумоподавления автомобильного глушителя, состоящую из резонатора и глушителя, в котором выхлопной газ проходит через перегородки и камеры, образующие каналы. Благодаря рассчитанным параметрам устройств шумоподавления, происходит гашение звука различных частот за счет изменения сечения и направления потока выхлопных газов, самопоглощения звуковых волн в резонаторе Гельмгольца и применения звукопоглощающих материалов [20, 21].

В крупных автотранспортных предприятиях, в том числе и в ТОО «Автобусный парк №3» города Караганды, для снижения выбросов окислов азота широко применяется система SCR (Selective Catalytic Reduction – избирательная каталитическая нейтрализация) [22]. Работа системы SCR основывается на способности аммиака, являющегося продуктом распада жидкости AdBlue, впрыскиваемой в выхлопные газы перед каталитическим нейтрализатором, вступать в химическое взаимодействие с оксидами азота в присутствии катализатора и обезвреживать их, образуя газообразный азот и водяной пар. Этот способ применяется в основном в дизельных двигателях. В дизельном двигателе высокие степень сжатия, коэффициент избытка воздуха, температура сгорания обуславливают более высокий уровень выбросов окислов азота по сравнению с бензиновыми ДВС.

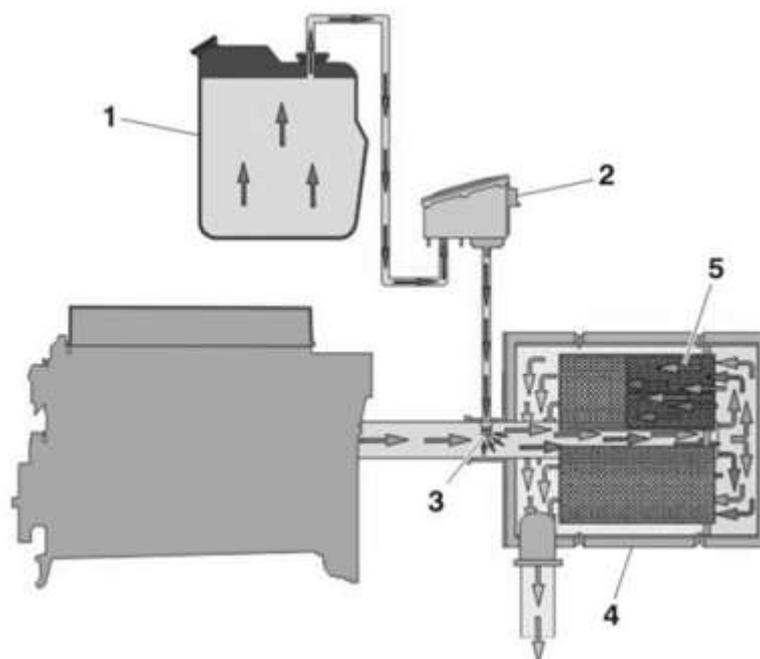
Схема системы очистки отработавших газов по технологии SCR представлена на рисунке 1.5. Жидкость AdBlue, представляющая собой раствор высокоочищенной мочевины, из бака 1 подается насосом 2 в блок дозирования 3 и впрыскивается в отработавшие газы перед их поступлением в каталитический нейтрализатор 5. Дозирование осуществляет система управления двигателем EMS, обеспечивая оптимальное сокращение выбросов на любых режимах работы ДВС. [23]

В системе выпуска при высокой температуре мочевины в процессе термолитического и последующего гидролитического распада на аммиак и угольную кислоту. Аммиак при температуре свыше 170°C в присутствии катализатора вступает в реакцию с оксидами азота, образуя безвредные молекулы азота и воды. Эта система эффективно нейтрализует окислы азота, но не влияет на выброс сажи.

Использованию каталитических нейтрализаторов ОГ на дизелях препятствует большое наличие сажи в выбросах. Поэтому здесь в первую очередь требуется очистка выбросов от этого компонента [24 стр. 228].

Для снижения выброса в атмосферу сажи и других продуктов неполного сгорания топлива в системах выпуска отработавших газов ДВС служат сажевые фильтры, применение которых необходимо для приведения в соответствие выбросов ДВС к Европейским экологическим стандартам Евро-5, Евро-6 [25], конструкция которых совершенствуется с целью получения оптимальных характеристик газового потока для лучшей очистки отработавших газов.

Известно устройство очистки выхлопных газов от мелких твердых частиц путем фильтрации газов через пористые перегородки или специальную шерстяную, хлопчатобумажную либо стеклянную ткань.



1 – бак с раствором AdBlue; 2 – насосный блок; 3 – блок дозирования;
4 – глушитель; 5 – каталитический нейтрализатор.

Рисунок 1.5 – Схема системы очистки отработавших газов по технологии SCR

Одним из лучших конструктивных решений сажеуловителя считают фильтры регенеративного типа (рисунок 1.6) [24 стр. 229, 26, 27].

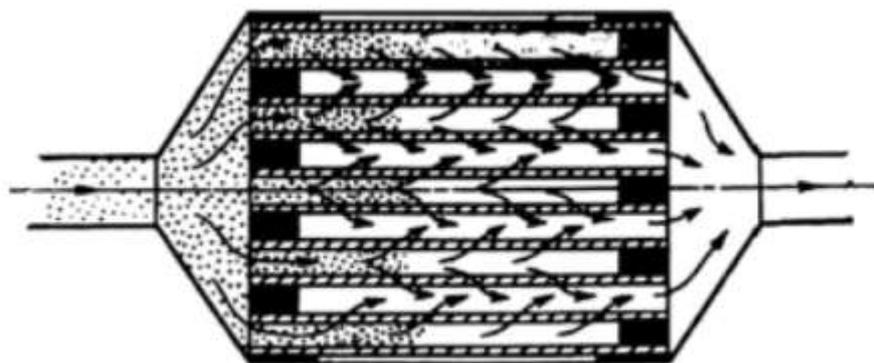


Рисунок 1.6 – Схема сажеуловителя с сотовой насадкой

Они представляют собой сотовую насадку с ячейками прямоугольного сечения. В качестве материала фильтра используется пористый кордиерит

(пористая керамика) с достаточной механической прочностью, стойкостью к агрессивным химическим веществам, сопротивлением к оплавлению и образованию трещин при тепловых воздействиях, а также термической стабильностью.

Накопившуюся в фильтре сажу удаляют двумя способами. Первый способ – термическое окисление, при котором отходящие газы нагреваются до 450°C и выше, что приводит к воспламенению накопившейся сажи.

Второй вариант предусматривает применение каталитических активаторов горения сажи. При этом упрощается система регенерации фильтра, поскольку все сводится к аварийному отключению при его недопустимо высоком аэродинамическом сопротивлении. В качестве каталитических активаторов горения сажи используют металлоорганические соединения и вещества на основе железа, цезия, марганца, наличие которых обеспечивает поддержание температуры отработавших газов на необходимом уровне. При этом концентрация активаторов горения сажи в топливе должна составлять порядка 0,02 %. [24 стр. 229]

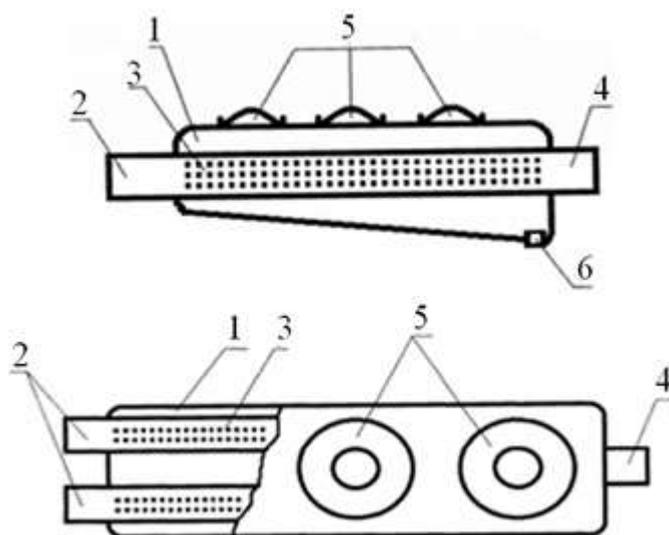
Для повышения эффективности очистки отработавших газов и продления службы фильтрующих элементов учеными-разработчиками предлагаются различные вспомогательные устройства [28]. Известен способ и устройство для нейтрализации выхлопных газов автомобилей, включающий атомизацию молекул газа с последующей рекомбинацией, приводящей к образованию стабильных молекул N_2 , CO_2 , PbO_2 , затем фильтрацию и сбор твердых частиц (Заявка о выдаче патента Российской Федерации на изобретение, RU 2012 128 128 А от 10.01.2014, F01N3/00), где выхлопной газ обрабатывается монохромным спектром ультрафиолетового излучения. Недостатком такой конструкции является низкая эффективность очистки выхлопных газов.

Известен способ и устройство для ультразвуковой нейтрализации газов, включающий атомизацию молекул газа с последующей рекомбинацией, приводящей к образованию стабильных молекул N_2 , CO_2 , PbO_2 , затем фильтрацию и сбор твердых частиц (Заявка о выдаче патента Российской Федерации на изобретение, RU 2012 128 123 А от 10.01.2014, B01D 53/00), где выхлопной газ подвергается воздействию ультразвуковых колебаний, а для разбавления выхлопного газа перед атомизацией используется ионизированный воздух создаваемый озонатором. Недостатками такой конструкции является сложность конструкции и низкая эффективность очистки выхлопных газов.

Группой ученых КарГТУ (ныне КарТУ) под руководством д.т.н. Кадырова А.С. была предложена конструкция устройства для очистки выхлопных газов, основанная на их ультразвуковой обработке и позволяющая повысить эффективность снижения вредных выбросов ДВС и срок службы фильтрующих элементов системы выпуска отработавших газов [29]

Устройство для очистки выхлопных газов (рисунок 1.7) содержит корпус 1, впускные отверстия 2, перфорированные трубы 3, проходящие через корпус закрепленные сваркой, выпускное отверстие 4, ультразвуковые устройства 5 установленные на корпусе и отверстие с пробкой 6 для слива образовавшейся смеси. [29]

Отработавшие выхлопные газы поступают через впускные отверстия 3 по перфорированным трубам 2 в корпус 1 и под действием ультразвуковых волн, испускаемых ультразвуковыми устройствами 5, твердые частицы, содержащиеся в выхлопном газе оседают на дне корпуса, очищенный газ выводится в атмосферу через выпускное отверстие 4, образовавшаяся смесь путем снятия пробки 6 вытекает в определенную емкость.



1 – корпус; 2 – перфорированные трубы; 3 – впускные отверстия; 4 – выпускное отверстие; 5 – ультразвуковые устройства; 6 – пробка для слива

Рисунок 1.7 – Устройство для очистки выхлопных газов

Вследствие этого в атмосферу выделяется выхлопной газ, очищенный от твердых примесей. [29]

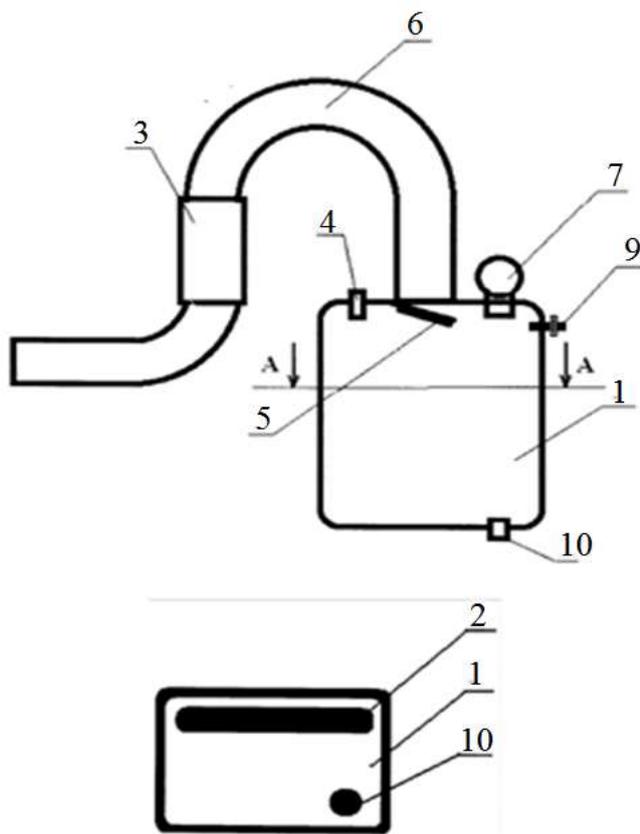
Также, группой учёных КарГТУ (ныне КарТУ) было разработано устройство для изоляции отработавших газов [30]. Изоляция отработавших газов применяется для снижения концентрации вредных веществ в зонах скопления автотранспортной техники. При этом выхлопные газы собираются (изолируются) в емкость и выпускаются в атмосферу после выезда автомобиля из вышеуказанной зоны.

Устройство для изоляции отработавших газов (рисунок 1.8) [30], состоящее из накопительной емкости, компрессора, соединительного патрубка, насадки с вентилем при этом накопительная емкость выполнена с встроенным холодильным устройством, установка снабжена

перепускным и обратным клапанами, манометрами, насадка с вентиляем, на дне накопительной емкости выполнено отверстие с пробкой.

Устройство для изоляции отработавших газов содержит накопительную емкость 1 с холодильным устройством 2, компрессор 3, перепускной клапан 4, обратный клапан 5, соединительный патрубок 6, манометры 7, 8, насадку с вентиляем 9 и пробку с отверстием 10.

Работа устройства для изоляции отработавших газов. При работе двигателя внутреннего сгорания газы начинают поступать в выхлопную трубу. Затем через соединительный патрубок 6 отработавшие газы нагнетаются компрессором 3 в накопительную емкость 1 с холодильным устройством 2, где часть газов конденсируется и сливается через отверстие с пробкой 10, а оставшаяся часть выпускается через насадку с вентиляем 9, в местах специально оборудованных очистными установками. Для исключения возврата газов в трубу накопительная емкость снабжена обратным клапаном 5.



1 – накопительная ёмкость; 2 – холодильное устройство; 3 – компрессор;
4 – перепускной клапан; 5 – обратный клапан; 6 – патрубок; 7, 8 – манометр;
9 – насадка с вентиляем; 10 – отверстие с пробкой.

Рисунок 1.8 – Устройство для изоляции отработавших газов

Устройство для изоляции отработавших газов снабжено манометрами 7 и 8 для контроля давления, расположенными соответственно на накопительной емкости и в кабине водителя (на схеме не показано), а также перепускным клапаном 4, выпускающий газы при достижении предельного давления в накопительной емкости. Техническим результатом предлагаемой полезной модели является повышение экологической безопасности транспортных средств, при работе двигателей внутреннего сгорания. Этот технический результат достигается тем, что в устройство для очистки выхлопных газов транспортных средств внесены следующие изменения: коагуляционные камеры установлены последовательно друг за другом и на выходе с камер вмонтированы фильтрационные сетки; под коагуляционными камерами установлены накопительные емкости с отверстиями с пробкой для слива. [30]

Одним из основных компонентов твердых примесей ОГ ДВС является сажа, выброс которой дизелями составляет до 15 кг на тонну сжигаемого топлива. В мировой практике наметилась тенденция рассмотрения сажи как вторичного материального ресурса (технический углерод) с использованием ее для нужд шинной промышленности. [24 стр. 168]

Приведенные выше устройства для ультразвуковой очистки выхлопных газов и изоляции отработавших газов позволяют производить сбор и утилизацию сажи и определяют направления дальнейших научных исследований.

1.2 Анализ способов очистки и состава отработавших газов

Атмосферный воздух является физической смесью составляющих его газов и характеризуется следующим средним составом на уровне моря (в процентах по объему): азот (78,08%); кислород (20,95%); углекислый газ (0,03%); инертные газы, озон, радон, торон, перекись водорода, аммиак, йод (0,94%) [31]. Кроме того, в воздухе в различных объемах содержатся водяные пары и тонкодисперсная пыль.

Углекислый газ, оксид углерода, диоксиды серы являются основными загрязнителями атмосферы, а также метан, фреоны, диоксид азота, озон, повышение концентрации которых влияет на температурный режим тропосферы. Работа промышленных предприятий, таких как черной металлургии, химических и нефтехимических, энергетических, строительной индустрии, а также эксплуатируемая транспортная техника самым негативным образом влияют на атмосферу, загрязняя её. [32, 33]

Состав отработавших газов чрезвычайно сложен и может насчитывать более трехсот компонентов [7, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41].

Вредные вещества (ВВ) ОГ подразделяют на регулируемые (нормируемые) и нерегулируемые (ненормируемые) выбросы. Основными нормируемыми токсичными компонентами выхлопных газов двигателей

являются угарный газ CO, углекислый газ CO₂, углеводороды C_mH_n, оксиды азота NO_x, дымность (дым) и сажа, а также твердые частицы [6 стр. 32, 42, 43, 44].

К ненормируемым выбросам ВВ относят: углерод С, водород Н, азот N, следы металлов, летучие соединения, сульфаты, диоксид серы SO₂, сероводород H₂S, цианиды, альдегиды RCHO, аммиак NH₃, фенолы, индивидуальные полициклические ароматические углеводороды и пахучие вещества [6 стр. 32]. Состав выхлопных газов автомобильных двигателей приведен в таблице 1.1 [6 стр. 33].

Таблица 1.1 – Состав выхлопных газов автомобильных двигателей

| Компоненты выхлопного газа | Пределы концентраций | |
|--|----------------------|---------------------|
| | Бензиновый двигатель | Дизельный двигатель |
| Кислород, O ₂ , % | 0,05 - 8,0 | 2,0 - 18,0 |
| Диоксид углерода | 5,0 - 12,0 | 1,0 - 10,0 |
| Оксид углерода, CO, % | 0,1 - 10,0 | 0,01 - 5,0 |
| Оксиды азота NO _x , % | 0,01 - 0,8 | 0,04 - 0,5 |
| Углеводороды C _m H _n , % | 0,02 - 2,0 | 0,01 - 0,5 |
| Альдегиды RCHO, % | 0,02 - 0,2 | 0,0001 - 0,002 |
| Азот N ₂ , % | 74,0 - 77,0 | 76,0 - 78,0 |
| Сажа, г/м³ | 0 - 0,005 | 0,01 - 0,95 |
| Бензапирен, C ₂₀ H ₁₂ , мкг/м ³ | 0 - 25,0 | 0 - 10,0 |
| Соединения свинца, мкг/м ³ | 0 - 60 | - |
| Пары воды, % | 3,0 - 3,5 | 0,05 - 4,0 |
| Оксид серы, SO _x , % | 0 - 0,008 | 0,002 - 0,02 |

Вредные вещества отработавших газов ДВС, выбрасываемых в атмосферу по характеру воздействия на организм человека подразделяют на следующие группы:

- токсичные (окись углерода, оксиды азота, двуокись серы, углеводороды, свинцовые соединения);
- канцерогенные (бензапирен);
- раздражающего действия (акролеин, формальдегид, двуокись серы, углеводороды)
- изменяющие качество среды обитания (углеводороды, сажа, пары масел). [24 стр. 133]

Все углеводороды, которые отличаются друг от друга числом атомов углерода С и водорода Н объединены в одну группу C_mH_n. Высокомолекулярные углеводороды оказывают наркотическое действие на человека. Нахождение в течении восьми часов в условиях присутствия паров бензина при концентрации 600 мг/м³ может вызвать у человека головные боли, кашель и неприятные ощущения в горле [6 стр. 33, 24 стр. 133].

Соединения оксидов азота, за исключением N₂O, являются весьма токсичными ВВ выхлопных газов. По снижению термодинамической

устойчивости оксиды азота (NO_x) продуктов сгорания топлива можно расположить в ряд следующим образом: оксид азота (NO), гемиоксид азота (N_2O), диоксид (NO_2), триоксид или азотистый ангидрид (N_2O_3), тетраоксид азота (N_2O_4), диоксид (NO_2) и пентаоксид азота или азотный ангидрид (N_2O_5). В атмосферу поступает в основном диоксид NO_2 . В выхлопных газах оксиды азота находятся преимущественно в виде NO , которые затем в результате атмосферных реакций превращаются в NO_2 в течение от получаса до 100 часов. [6 стр. 33, 24 стр. 134]

Гидронитрат пероксиацетила (ПАН) раздражает слизистые оболочки глаз, у людей, страдающих астмой вызывает обострение. Образуется на солнечном свете при реакции C_mH_n и NO_x . [6 стр. 35]

Оксид углерода или угарный газ (CO) представляет собой ядовитый газ без цвета, вкуса и запаха и поэтому без специальных приборов его обнаружение практически невозможно. Удельный вес оксида углерода при 0°C составляет $1,25 \text{ кг/м}^3$, что меньше воздуха ($1,293 \text{ кг/м}^3$), что способствует его быстрому распространению в атмосфере. Относительная плотность по воздуху – $0,97$; а температура кипения – 195°C . Проникая в кровь, вступает в реакцию с гемоглобином, образуя устойчивое соединение карбоксигемоглобин, в результате чего развивается гипоксия. [6 стр. 35, 24 стр. 133]

Диоксид углерода – углекислый газ, имеющий слегка кисловатый запах и вкус, относительная плотность по воздуху $1,5$. Углекислый газ хорошо растворяется в воде. При 20°C в 1 объеме воды растворяется $0,88$ объема газа. Он входит в состав атмосферы Земли ($0,03\%$ по объему) и не является токсичным. [6 стр. 35]

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – высокоактивные вещества. В ОГ ДВС образуется свыше 20 ПАУ. Они переходят непосредственно из топлива в ОГ в жидкой или газообразной форме в результате неполного сгорания. [6 стр. 35]

Альдегиды – органические кислородосодержащие углеводороды RC(O)H (иногда обозначают $\text{R}\cdot\text{CHO}$), содержащие в молекуле карбонильную группу (CHO), связанную с атомом H и углеводородным радикалом R (RCH_3 , C_6H_5 и др.). Содержание альдегидов в ОГ бензиновых двигателей составляет 30 мг/м^3 , а дизельных – 240 мг/м^3 . Альдегиды ОГ содержатся в виде акролеина и формальдегида. Содержание альдегидов в ОГ бензиновых двигателей достигает 8 мг/м^3 . [6 стр. 35]

Бензапирен ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, молекулярная масса $252,32$), представляющий собой иглообразные кристаллы желтого цвета, по степени канцерогенности является наиболее вредным и опасным для человека, даже в малых концентрациях, веществом. Температура плавления бензапирена составляет $+179^\circ\text{C}$, а кипения – $+312^\circ\text{C}$. [24 стр. 134] В ОГ он может находиться в различных состояниях (твердом, жидком и газообразном). Бензапирен адсорбируется в сажевых частицах, образующихся при сгорании топлива. Образование бензапирена происходит при температуре от 400 до 700°C .

Доля бензапирена в суммарном выбросе токсичности у бензиновых ДВС составляет от 2,1 до 3,3%, дизельных – до 3,7%, газотурбинных – не более 1,1%. [6 стр. 134]

Аэрозоли – это дисперсные системы, состоящие из мелких частиц. Они могут длительное время находиться в воздухе во взвешенном состоянии. Аэрозоли включают пыль, дым и туман. Частицы продуктов сгорания классифицируют по размерам на крупные или грубые – размером свыше 40 – 45 мкм; средние – от 1 до 40 мкм и мелкие или тонкодисперсные размером менее 1 мкм. В непосредственной близости от поверхности Земли частицы могут находиться во взвешенном состоянии в течение от 1 до 5 суток, в тропосфере – от 5 до 10 суток и в стратосфере – около года. [6 стр. 36]

Дисперсные частицы радиусом от 0,2 до 5,0 мкм задерживаются в легких, вызывая негативные изменения в органах дыхания. Основной состав твердых частиц (ТЧ) включает углерод, минеральные частицы, золу, металлические частицы, продукты износа поверхностей трения. Примерный состав ТЧ в ОГ дизельных двигателей приведен в таблице 1.2. [6 стр. 36, 45]:

Таблица 1.2 – Примерный состав твердых частиц в отработавших газах дизельных двигателей

| Компонент ОГ | Содержание, % |
|--------------------------|---------------|
| Углерод (сажа) | 41 |
| Растворимые продукты: | |
| топливо | 7 |
| смазочное масло | 25 |
| Сульфаты металлов и вода | 14 |
| Остаток | 13 |

Содержание серы в дизельном топливе оказывает влияние на удельный выброс ТЧ. Так, снижение серы с 0,4 до 0,02 % сокращает удельный выброс ТЧ на 25,0 %. Выброс ТЧ дизельного двигателя от 30 до 70 раз превышает выброс частиц бензинового двигателя. [6 стр. 37]

Отдельно следует остановиться на саже. Сажа – аморфный углерод, образующийся при неполном сгорании топлива и представляющий собой твердые сферические частицы, не имеющие кристаллической решетки.

Наличие сажи становится видимым уже при концентрации 130 мг/м³ отработавших газов. При повышении концентрации до 600 мг/м³ выхлопные газы имеют цвет средней черноты. Исследованиями ученых установлено, что основная часть частиц сажи (порядка 87 - 98%), отфильтрованных из черного дыма, имеют размеры от 0,04 до 0,50 мкм, которые, в свою очередь, состоят из более мелких частиц размером от 0,015 до 0,170 мкм. Отдельные частицы собираются в группы из двух, десяти и более частиц, иногда формируясь в цепочки, включающие до 30 частиц, или собираясь в массы от 100 до 1000 частиц. Частицы сажи имеют круглую или овальную форму. Поверхность частиц 1 г сажи может достигать 75 м² и в 1 м³ видимых выхлопных газов

имеется 10 м^2 поверхности для осаждения на ней канцерогенных веществ, в частности бензапирена, а для ОГ средней черноты – до 45 м^2 . Поэтому, автомобильная сажа сама по себе хоть и не является токсичной, но опасна как механический загрязнитель легких человека и как активный переносчик канцерогенных веществ. [15, 12]

Кроме того, как указывалось выше, твердые частицы сажи размером менее $2,5 \text{ мкм}$ и особенно ультрадисперсные твердые частицы размером менее $0,1 \text{ мкм}$ могут вызывать у людей неврологические заболевания, включая мигрень, головную боль, церебро-сердечный инсульт, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона и другие формы деменции [1, 2, 4].

Образование сажи и ТЧ происходит в результате разложения топлива в условиях высокой температуры и давления при недостатке кислорода. Эти условия наблюдаются в дизельном ДВС в ядре топливного факела. [5 стр. 139, 6 стр. 86]

Оксиды серы (SO_x) – газы, которые образуются при работе двигателя на сернистых топливах. Диоксид серы (SO_2) – бесцветный газ, относящийся к токсичным и раздражающего действия компонентам выхлопных газов, с характерным резким запахом. При взаимодействии с водой, хорошо растворяется в ней с образованием сернистой кислоты H_2SO_3 . В небольших концентрациях (25 мг/м^3) SO_2 создает неприятный вкус во рту, раздражает слизистые оболочки глаз и дыхательные пути. Концентрация SO_2 свыше 1 мг/м^3 может привести к смертельным случаям у людей, страдающих бронхо-лёгочными заболеваниями. [6 стр. 37, 24 стр. 134]

Сернистый водород (H_2S) – бесцветный, сладковатый, хорошо растворимый в воде газ с характерным неприятным тяжёлым запахом тухлых яиц. Температура кипения сернистого водорода составляет – $60,4^\circ\text{C}$. Концентрация H_2S выше $0,008 \text{ мг/м}^3$, оказывает негативное воздействие на здоровье человека. [6 стр. 38]

Этилмеркаптан, как одорант добавляют в газообразное топливо. Запах этилмеркаптана ($\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$) ощущается даже при содержании $0,19 \text{ мг/м}^3$ в воздухе. Добавки одоранта этилмеркаптана ($\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$) в концентрациях менее $0,001\%$ по массе не оказывают влияния на организм человека и не воздействуют на материалы элементов системы питания. [6 стр. 38]

Существующие в промышленности методы очистки газов от технических загрязнений обеспечивают эффективное удаление или снижение содержания таких вредных компонентов, как NO_x , SO_2 , H_2S , NH_3 , оксида углерода, различных органических и неорганических веществ [46, 33]. Из обзора литературных источников [33, 47, 48, 49, 50] различают следующие основные методы очистки газов: абсорбционный и адсорбционные методы, термическое дожигание, термодокаталитические методы, озонные методы, биохимические методы, плазмодокаталитический метод, фотодокаталитический метод, ультразвуковой метод. Классификация основных методов очистки газов от технических загрязнений, представлена на рисунке 1.9. [33]

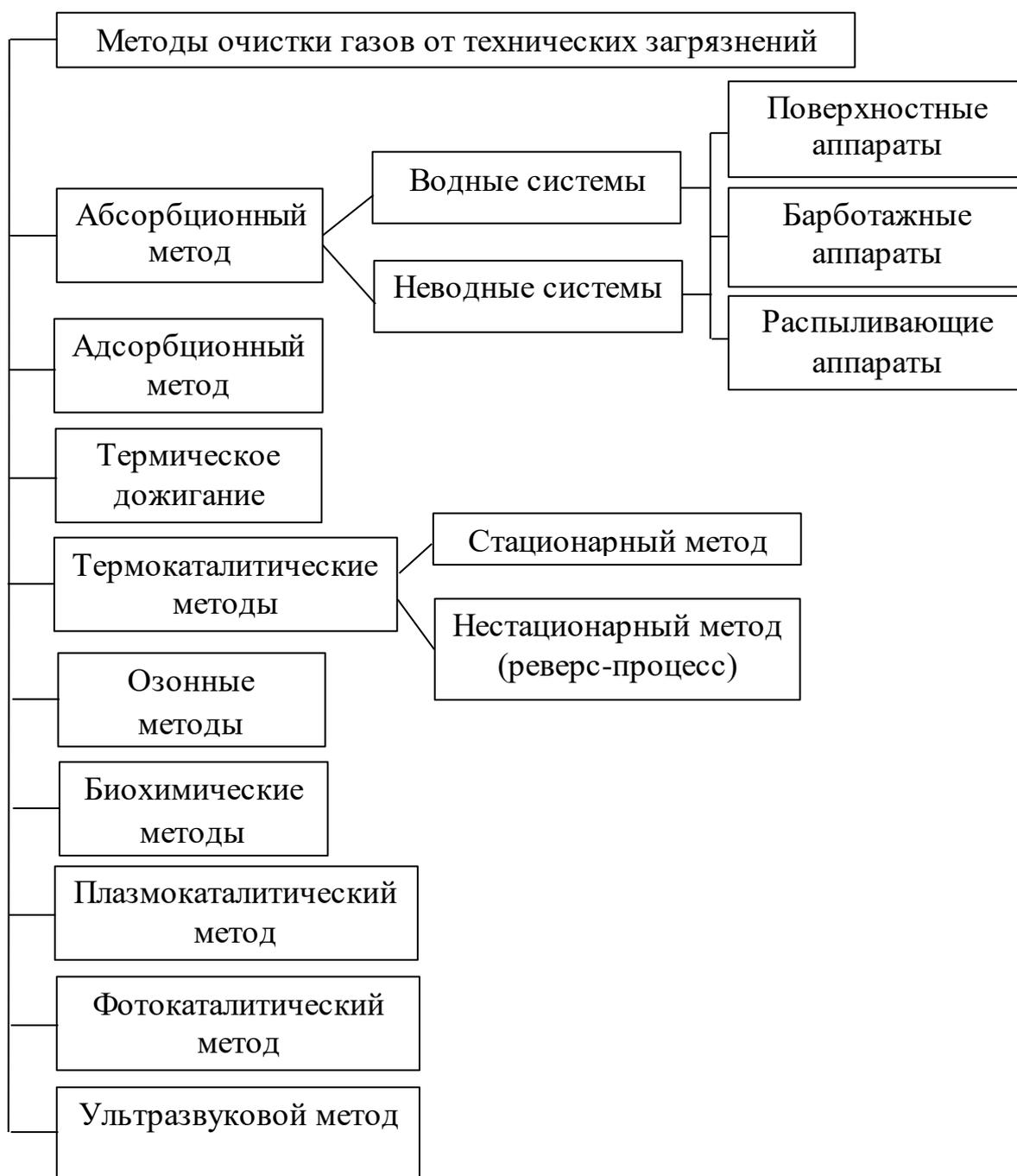


Рисунок 1.9 – Классификация методов очистки газов от технических загрязнений.

Абсорбция представляет собой процесс поглощения газообразного компонента всей массой жидкости. Различают водные и неводные абсорбционные системы. В первом случае в качестве абсорбента служит вода, во втором случае – как правило, малолетучие органические жидкости.

Так как абсорбция происходит на поверхности раздела фаз, то для эффективного протекания процесса абсорбции необходимо создание как можно большей площади поверхности соприкосновения фаз. По способу образования поверхности соприкосновения фаз различают поверхностные, барботажные и распыливающие абсорбционные аппараты. [33, 48 стр. 97]

В первом случае поверхностью соприкосновения фаз является поверхность жидкости или поверхность текучей пленки жидкости. Насадочные абсорбенты также относятся к группе поверхностных аппаратов, в которых загружены насадки из тел различной формы по поверхности которых стекает абсорбирующая жидкость. [33, 48 стр. 111]

В барботажной группе аппаратов увеличение поверхности контакта происходит благодаря тому, что поток газа распределяется в адсорбционной жидкости в виде пузырьков и струй. Посредством пропускания очищаемого газа через аппарат, заполненный адсорбирующей жидкостью, либо в аппаратах колонного типа с тарелками различной формы осуществляют барботаж. [33, 48 стр. 113]

В распыливающих адсорбционных аппаратах абсорбирующая жидкость распыляется в объеме газа. При этом создаваемая поверхность контакта и эффективность адсорбционного процесса зависит от дисперсности частиц распыленной жидкости. В промышленности наиболее распространены аппараты насадочного (поверхностного) типа и барботажные тарельчатые абсорберы [33, 48 стр. 113]. Общими недостатками адсорбционных методов является образование жидких стоков и громоздкость аппаратного оформления. [33, 48 стр. 113]

Адсорбция – это процесс поглощения вещества из газовой или жидкой среды поверхностью твердого тела. В качестве адсорбента в промышленности наиболее распространены активированные угли, сложные оксиды и импрегнированные сорбенты [48 стр. 125].

После адсорбционной очистки могут производить десорбцию, извлекая и утилизируя уловленные компоненты, необходимые для дальнейшего использования в промышленности. Десорбция примесей производится путем нагревания адсорбента, вакуумирования, продувки инертным газом или вытесняя примеси легкоадсорбирующим веществом. В качестве такого вещества может использоваться водяной пар. В случае если адсорбированные примеси не представляют ценности или их извлечение экономически нецелесообразно, их подвергают термическому или каталитическому дожиганию. Если к тому же используется дешевый адсорбент, его не регенерируют, а подвергают захоронению или сжиганию вместе с загрязнителем. [48 стр. 127].

Применение адсорбционных методов позволяет извлечь из газовых отходов производства и утилизировать ценные соединения. При достаточно высоких концентрациях примесей очистка оказывается еще и экономически выгодной. Высокая энергоёмкость извлечения адсорбированных веществ и их разделение, особенно многокомпонентных смесей, сдерживает его широкое применение. [48 стр. 128]

Термическое дожигание представляет собой метод обезвреживания газов путем термического окисления. При этом вредные вещества, в основном органические, являющиеся продуктами неполного сгорания, в процессе дожигания при высокой температуре, находящейся в пределах от

750 до 1200°С превращаются в практически безвредные, преимущественно CO₂ и H₂O. Обезвреживание газов этим методом позволяет достичь 99%-ной очистки. [48 стр. 147]

Однако, при термическом дожигании под действием высоких температур могут образовываться более токсичные газы, чем исходный газовый выброс. Поэтому при выборе метода обезвреживания необходимо это учитывать и при термическом дожигании газов, содержащих соединения серы, галогенов, фосфора необходимо предусматривать дополнительную очистку. [48 стр. 148]

Целесообразность применения термического дожигания обуславливается такими важными факторами, как затраты энергии, необходимой для создания и поддержания высоких температур в зоне дожигания, теплотворная способность обезвреживаемых примесей, а также возможность предварительного разогрева исходных газов.

В отдельных случаях, при достаточно высокой концентрации и теплотворной способности примесей, температура в реакторе может поддерживаться за счет тепла, выделяющегося при окислении вредных примесей и при предварительном разогреве исходного газа за счет тепла отходящих обезвреженных газов без дополнительных энергозатрат, т.е. в так называемом автотермическом режиме. [48 стр. 148]

Широкое применение термические методы получили при очистке газов от токсичных горючих соединений. Их применение весьма эффективно для дожигания пыли многокомпонентных и запыленных отходящих газов. [33, 48 стр. 148]

Термокаталитические методы очистки газов являются наиболее универсальными в силу того, что с помощью них очищаются газы от оксидов серы и азота, СО, органических и других токсичных примесей. За счет каталитических реакций вредные вещества преобразовываются в безвредные или менее вредные соединения, а иногда даже в полезные. Термокаталитические методы хорошо подходят для очистки многокомпонентных газов с достаточно высокой степенью очистки, даже при малых концентрациях вредных примесей и избегая образования вторичных загрязнителей. [48 стр. 135]

Процесс термокаталитической газоочистки может проходить в двух режимах – стационарном и нестационарном. При *стационарном методе* необходимая скорость химических реакций в дешевых промышленных катализаторах достигается в диапазоне температур от 200 до 600°С. Поскольку газы перед тем как подвергнуть их термокаталитической газоочистке предварительно очищают от пыли и различных каталитических ядов, они охлаждаются до более низких температур, чем это необходимо для протекания каталитических реакций с нужной скоростью. Поэтому очищаемые газы необходимо подогревать. [33, 48 стр. 140]

Нестационарный метод или реверс-процесс обеспечивает необходимый температурный режим за счет того, что удержание тепловой волны

происходит из-за периодической смены направлений фильтрации очищаемой газовой смеси в каталитическом слое при помощи клапанов.

Аппараты, использующие реверс-процесс при термокаталитической очистки стабильно работают при изменениях концентрации горючих смесей в очищаемом газе и отсутствии теплообменников, что выгодно их отличает от аппаратов стационарного метода очистки. [33, 48 стр. 141]

Несмотря на то, что катализатор не участвует в химических преобразованиях и не расходуется, в процессе термокаталитической очистки, он загрязняется и поэтому срок службы его ограничен. Кроме того, так как в современных термокаталитических системах в настоящее время используются катализаторы на основе драгоценных и цветных металлов, таких как медь, никель, золото, палладий, родий, хром, платина, стоимость устройств термокаталитической очистки достаточно высокая. Эти факторы сдерживают широкое применение термокаталитических методов очистки.

Создание дешевых катализаторов, способных эффективно работать при низких температурных режимах, устойчивых к различного рода каталитическим ядам является одним из основных направлений исследований ученых в развитии термокаталитических методов. [33, 48 стр. 136]

Озонные методы основаны на свойствах озона ускорять реакции окисления и применяют для очистки дымовых газов от SO_2 , (NO_x) и дезодорации газовых выбросов промышленных предприятий. При этом озон O_3 разлагается на молекулу кислорода O_2 и атомарный кислород O , который легко присоединяется к NO , образуя NO_2 и к SO_2 , с образованием SO_3 . После этого в очищаемые газы вводится аммиак, который химически взаимодействует с NO_2 и SO_3 с образованием сульфата и нитрата аммония, являющимися комплексными удобрениями, используемые в сельском хозяйстве. За короткое время от 0,4 до 0,9 секунд степень очистки газа от SO_2 достигает 80-90%, NO_2 - 70-80%. Причиной, сдерживающей применение этого метода в промышленности является высокая энергоёмкость процесса, которая составляет 4–4,5% от эквивалентной мощности энергоблока. [33, 48 стр. 156]

Применение озона для дезодорации газовых выбросов основано на окислительном разложении дурно пахнущих веществ. При этом дезодорация может осуществляться непосредственным введением озона в очищаемые газы, либо промывкой газов озонированной водой. Затем, озонированные газы могут пропускаться через слой активированного угля или катализатор. В присутствии катализатора, в качестве которого могут использоваться $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$, оксиды меди, кобальта, железа на носителе, превращения веществ, обладающих неприятным запахом, таких как амины, сероводород, ацетальдегид, происходит уже при 60-80 °С. Эти методы находят применение при дезодорации газов, выделяющихся при переработке сырья животного происхождения на предприятиях пищевой промышленности и в быту. [33, 48 стр. 157]

В основу *биохимических методов* очистки положена способность веществ разлагаться и преобразовываться под действием ферментов, вырабатываемых микроорганизмами. Однако этот способ, осуществляемый в биофильтрах, либо биоскрубберах, более применим при постоянном составе очищаемых газов. В противном случае микроорганизмы не успевают адаптироваться для выработки новых ферментов и снижается степень очистки от вредных примесей.

Для дезодорации воздуха используют биофильтры, в которых очищаемый газ проходит через слой насадки, поверхность которой покрыта биологически активной пленкой микроорганизмов. Для поддержания необходимой для жизнедеятельности микроорганизмов влажности, поверхность насадки орошается водой с питательными веществами, которая затем после фильтрации вновь подается на орошение.

В настоящее время аппараты биохимической очистки используются для обезвреживания в отходящих газах аммиака, фенола, крезола, формальдегида, органических растворителей покрасочных и сушильных линий, сероводорода, метилмеркаптана и других сероорганических соединений.

Основными недостатками биохимических методов являются низкая скорость биохимических процессов, что влечет за собой увеличение габаритов очистительного оборудования, специфичность штаммов микроорганизмов, вследствие чего затрудняется обработка многокомпонентных смесей, трудоемкость переработки смесей переменного состава. [33]

При *плазмохимическом методе* очищаемый газ с вредными примесями пропускается через высоковольтный разряд, под действием которого образуются озон, атомарный кислород, гидроксильные группы, возбужденные молекулы и атомы, легко вступающие в реакцию с вредными примесями. Плазмохимический метод очистки направлен на обезвреживание таких вредных примесей, как оксид серы, оксиды азота, органические соединения. Нейтрализация SO_2 и NO_x с применением аммиака производит порошкообразные удобрения сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$ и нитрат аммония NH_4NO_3 . [33, 48 стр. 157]

К недостаткам плазмохимического метода очистки можно отнести то, что на приемлемой мощности разряда при окислении органических компонентов разложение вредных веществ до воды и углекислого газа недостаточно полное. Необходимы дополнительные меры по обезвреживанию остаточного озона. Эффективность работы аппаратов с применением барьерного разряда существенно зависит от концентрации пыли. [33]

Плазмокаталитический метод является синтезом плазмохимического и каталитического методов очистки газов. Аппараты, функционирующие на основе этого метода, состоят из двух ступеней – озонатора и каталитического реактора. После плазмохимической обработки газ подвергается дальнейшей

очистке в каталитическом реакторе. При этом остаточный озон, синтезируемый при плазмохимической обработке, попадая на катализатор расщепляется на молекулярный и активный атомарный кислород. Благодаря доокислению кислородом остатки загрязняющих веществ, не уничтоженные в плазмохимическом реакторе, нейтрализуются на катализаторе.

Преимущество этого метода заключается в том, что протекание каталитических реакций производится при более низких температурах (40-100°C), чем при термокаталитических методах, что способствует увеличению срока службы катализаторов и снижение энергозатрат при концентрациях вредных веществ до 0,5 г/м³. К недостаткам можно отнести необходимость предварительной очистки газов от пыли (до 3-5 мг/м³), так как зависимость эффективности плазмокаталитической очистки от концентрации пыли весьма существенна. Стоимость оборудования и эксплуатационные расходы применения плазмокаталитического метода при больших концентрациях вредных веществ (более 1 г/м³) превышают аналогичные показатели термокаталитических методов очистки. [33, 48 стр. 157]

Фотокаталитический метод применяется для окисления органических соединений. При этом органические соединения подвергаются ультрафиолетовому облучению в присутствии катализатора на основе TiO₂. Однако, при фотокаталитическом методе очистки катализатор быстро засоряется продуктами реакции, что является существенным недостатком этого метода. В некоторых случаях для решения этой задачи в очищаемую смесь вводят озон, но эта технология применяется для ограниченного состава органических соединений и при небольших концентрациях. [33]

Ультразвуковой метод очистки основан на способности ультразвуковых волн определенной частоты и интенсивности ускорять процессы коагуляции и осаждения (седиментации) мелкодисперсных частиц. Кроме того, исследованиями российских ученых Нестеровым В.А., Доровских Р.С. [51, 52] было доказано, что предварительное ультразвуковое воздействие на отходящие газы повышает эффективность инерционного газоочистного оборудования, особенно в отношении наиболее опасных для здоровья людей ультрадисперсных частиц размером менее 5 мкм.

Для снижения токсичности отработавших газов транспортной техники наибольшее распространение получили абсорбционные, термокаталитические методы, термическое дожигание. Устройства снижения токсичности отработавших газов, основанные на термокаталитических методах, являются наиболее эффективными, но и более дорогостоящими.

Для решения вопроса использования ультразвукового метода очистки отработавших газов на транспортной технике, требуется разработка наиболее эффективных конструкций глушителей, оснащенных устройствами ультразвуковой очистки отработавших газов и проведение дополнительных исследований. [33]

1.3. Анализ состава и типов используемых автобусов на примере г. Караганды

Наибольшее скопление автотранспортной техники и соответственно наибольший уровень загрязнения воздуха вредными выбросами отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) наблюдается в крупных городах [53, 7]. Вредные выхлопы отработавших газов выбрасываются в атмосферу, загрязняя ее угарным газом, оксидами азота, углеводородами, оксидами серы, сажей, канцерогенами и другими токсичными компонентами. Несмотря на предпринимаемые меры, такие как введение экологических стандартов Евро, контроль токсичности отработавших газов при технических осмотрах автотранспортных средств и др., ситуация с загрязнением окружающей среды остаётся напряжённой. В большинстве городов Казахстана показатель загрязнённости превышает допустимую норму в несколько раз. В 2021 году чистый воздух только в Актау и Петропавловске. [54]

С неуклонным ростом численности автотранспортных средств в крупных городах обостряются и экологические проблемы, связанные с загрязнением атмосферы. В таблице 1.3 представлено количество транспортных средств и прицепов к ним, зарегистрированных на территории Республики Казахстан.

Таблица 1.3 – Количество транспортных средств и прицепов к ним, зарегистрированных на территории Республики Казахстан

| № п.п. | Регион | А (мото) | В (легков) | С (грузов) | Д (автобус) | Е (прицеп) | Всего |
|--------|-----------------------|----------|------------|------------|-------------|------------|---------|
| 1 | Акмолинская обл. | 3518 | 162102 | 28013 | 3124 | 6662 | 203419 |
| 2 | Актюбинская обл. | 1259 | 131747 | 23127 | 3226 | 6439 | 165798 |
| 3 | Алматинская обл. | 4270 | 467222 | 60023 | 7288 | 11452 | 550255 |
| 4 | Атырауская обл. | 895 | 108347 | 19075 | 5481 | 4219 | 138017 |
| 5 | ЗКО | 683 | 111466 | 15161 | 3422 | 5222 | 135954 |
| 6 | Жамбылская обл. | 1682 | 191792 | 24770 | 4046 | 6472 | 228762 |
| 7 | Карагандинская обл. | 3159 | 276056 | 32318 | 5684 | 6534 | 323751 |
| 8 | Костанайская обл. | 2250 | 161757 | 30851 | 3075 | 10139 | 208072 |
| 9 | Кызылординская обл. | 1814 | 104023 | 19751 | 4210 | 3567 | 133365 |
| 10 | Мангистауская обл. | 350 | 127108 | 20572 | 4197 | 3231 | 155458 |
| 11 | Павлодарская обл. | 2507 | 144472 | 21033 | 4137 | 6661 | 178810 |
| 12 | СКО | 3239 | 122224 | 21885 | 2119 | 5915 | 155382 |
| 13 | Туркестанская область | 2001 | 395994 | 53120 | 11015 | 10770 | 472900 |
| 14 | ВКО | 5560 | 286042 | 35847 | 5568 | 11274 | 344291 |
| 15 | г. Нур-султан | 2011 | 275313 | 25027 | 5506 | 4713 | 312570 |
| 16 | г. Алматы | 4857 | 448866 | 37618 | 8859 | 7435 | 507635 |
| 17 | г.Шымкент | 253 | 109869 | 11450 | 2624 | 4 | 124200 |
| Итого | | 40308 | 3624400 | 479641 | 83581 | 110709 | 4338639 |

В настоящее время при оценке экологической обстановки большое внимание уделяется содержанию в воздухе мелкодисперсных твердых частиц размером 2,5 мкм и менее. Среди загрязнителей, обычно измеряемых в режиме реального времени, в настоящее время считается, что мелкодисперсные твердые частицы (PM_{2,5}) являются наиболее вредными для здоровья человека. Воздействие PM_{2,5} было связано с негативными последствиями для здоровья, такими как сердечно-сосудистые заболевания, респираторные заболевания и преждевременная смертность. PM_{2,5} определяется как частицы, находящиеся в воздухе окружающей среды, размером до 2,5 микрон. Эти частицы имеют различный химический состав и поступают из различных источников. Наиболее распространенные источники, созданные человеком, включают автомобили, работающие на ископаемом топливе, производство электроэнергии, промышленную деятельность, сельское хозяйство и сжигание биомассы. Микроскопический размер PM_{2,5} позволяет этим частицам глубоко всасываться в кровоток при вдыхании, потенциально вызывая такие заболевания, как астма, рак легких и болезни сердца. Воздействие PM_{2,5} также было связано с низкой массой тела при рождении, увеличением числа острых респираторных инфекций и инсультом.

В Докладе о качестве воздуха в мире за 2020 год анализируются данные PM_{2,5}, сообщаемые наземными станциями мониторинга по всему миру, агрегированные с помощью информационной платформы IQAir по качеству воздуха. В рейтинге самых загрязненных стран мира о показателю PM 2.5 из 106 стран мира по данным World Air Quality Report Region & City PM_{2.5} Ranking [55] на 2020 год Казахстан занимает 32 позицию.

Рост числа заболеваний, в том числе онкологических, по которым Казахстан занимает одно из первых мест среди стран СНГ, в настоящее время связывается со значительным загрязнением окружающей среды. [56]

Караганда является одним из крупных городов Казахстана с населением 497777 жителей [57]. Карагандинская область характеризуется высокими показателями заболеваемости и смертности населения, сложной демографической ситуацией даже на фоне неблагоприятного состояния здоровья республики в целом, характеризующегося ростом заболеваемости людей многими болезнями. Высокий уровень заболеваемости отмечается уже длительное время и имеет устойчивую тенденцию к росту, что существенно беспокоит общество. По результатам анализа уровня загрязнения атмосферного воздуха и осадков на основании данных, представленных в источнике [58] следует сделать заключение о высоком уровне загрязнения атмосферного воздуха г. Караганды газами и аэрозолями, тяжелыми металлами (кадмий), что определяет повышенные риски здоровью при проживании населения. Автотранспорт является одним из основных источников загрязнения. [58]. Причем, выброс в атмосферу твердых мелкодисперсных частиц преобладает в основном у двигателей, работающих на дизельном топливе, которыми оснащены небольшая часть легкового

транспорта и основная масса грузовых автомобилей и автобусов. Наиболее подвержены загрязнению центральные улицы города, особенно в «часы пик». В центральной части города Караганда существует запрет на проезд грузовых автомобилей с полной массой более 3,5 тонн. Однако наряду с легковыми автомобилями по центральным улицам города осуществляют перевозки пассажиров маршрутные автобусы, которые в основном оснащены дизельными двигателями, характеризующимися повышенным сажеобразованием.

Перевозка пассажиров в городе Караганда осуществляется по 51 городским и пригородным автобусным маршрутам. Основными перевозчиками пассажиров по автобусным маршрутам являются ТОО «Автобусный парк №2», ТОО «Автобусный парк №3», ТОО «Автобусный парк №5». Перечень маршрутов и перевозчиков представлен в таблице 1.4.

Большая часть маршрутов г. Караганды проходит через центральную её часть (таблица 1.5), характеризующуюся высокой степенью загрязненности атмосферного воздуха вредными выбросами отработавших газов двигателей внутреннего сгорания из-за высокой концентрации транспортных средств, особенно в «часы пик».

Таблица 1.4 – Автобусные маршруты и перевозчики города Караганды

| № пп | № маршрута | Наименование маршрута | Перевозчик | Прохождение маршрута через центральную часть города |
|------|------------|---|-----------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | РГТО-Аэлита | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 2 | 5 | Детская больница - РГТО | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 3 | 7 | Кирзавод 3-4 - 30-й микрорайон | ТОО "Автобусный парк Арман" | Да |
| 4 | 10д | Столовая - с/о Натуралист | ТОО "Экспресс" | Нет |
| 5 | 10пд | Татимбета - с/о Натуралист | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 6 | 11д | Столовая - с/о Космос | ТОО "Экспресс" | Нет |
| 7 | 15 | Автостанция Пришахтинск - Конечная (Старая Тихоновка) | ТОО "Автобусный парк №5" | Нет |
| 8 | 16 | Куанышбаева - Куанышбаева | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 9 | 19 | Метро - Экономический университет | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 10 | 26 | Кафе Жастар - Вокзал | ТОО "Автобусный парк №2" | Да |

Продолжение таблицы 1.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|-----|---|--|-----|
| 11 | 27 | Кафе Жастар - Автостанция Пришахтинск | ТОО "Автобусный парк №5" | Нет |
| 12 | 33 | Таттимбета - Завод ЖБИ | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 13 | 34 | Горняк - Экономический университет | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 14 | 37 | Завод ЖБИ - Супермаркет Ёжик | ТОО "Автобусный парк №2" | Нет |
| 15 | 40 | 30-й микрорайон - 14-й микрорайон | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 16 | 41 | Конечная - Конечная | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 17 | 42 | Рабочий посёлок 6 бригада - Лермонтова ул. | ТОО "Автобусный парк №2" | Нет |
| 18 | 43 | 14-й микрорайон - 30-й микрорайон | ТОО "Автобусный парк №2", ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 19 | 44 | 14-й микрорайон - Экономический университет | ТОО "Автобусный парк №2" | Да |
| 20 | 45 | Автостанция Юго-Восток - 23- й микрорайон | ТОО "Автобусный парк №3", ТОО "Автобусный парк №5" | Да |
| 21 | 46 | а/с "30 микрорайон" - кафе "Жастар" | ТОО "Автобусный парк №2" | Нет |
| 22 | 47 | 14-й микрорайон - 23-й микрорайон | ТОО "Автобусный парк №5" | Нет |
| 23 | 49 | 23-й микрорайон - Автостанция Юго-Восток | ТОО "Автобусный парк №5" | Нет |
| 24 | 53 | Автостанция Юго-Восток - Горняк | ТОО "Автобусный парк №3", ТОО "Автобусный парк №5" | Да |
| 25 | 55 | Завод ЖБИ - 26-й квартал | ТОО "Автобусный парк №5" | Да |
| 26 | 56 | 14-й микрорайон - Таттимбета | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 27 | 60д | Гульдер-2 - Конечная | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 28 | 61д | Гульдер-2 - с/о Демалыс | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |

Продолжение таблицы 1.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|-----|--|--------------------------|-----|
| 29 | 68 | 14-й микрорайон - Магазин (пос. Курьяновский) | ТОО "Автобусный парк №2" | Нет |
| 30 | 69 | 14-й микрорайон - Поликлиника №4 | ТОО "Автобусный парк №2" | Нет |
| 31 | 70 | ДСУ-19 - Метро | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 32 | 71 | 14-й микрорайон - 14-й микрорайон | ТОО "Автобусный парк №2" | Нет |
| 33 | 73 | Жана Озен - Автостанция Юго-Восток | ТОО "Автобусный парк №5" | Да |
| 34 | 75д | Автостанция "14 микрорайон" - с/о Оптимист 2 | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 35 | 76д | Автостанция "14 микрорайон" - с/о Вишневый сад | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 36 | 84 | 14-й микрорайон - Ботакара | ТОО "Автобусный парк №2" | Нет |
| 37 | 90 | Конечная - Сарань | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 38 | 100 | 14-й микрорайон - Автовокзал | ТОО "Манас" | Нет |
| 39 | 107 | Автовокзал - Автовокзал | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 40 | 111 | Автовокзал - Спасск | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 41 | 115 | Автовокзал - Жумабек | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 42 | 118 | Кафе Жастар - Автостанция Юго-Восток | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 43 | 119 | Автостанция "Юго-Восток" → поселок "Курлыс" | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |
| 44 | 121 | Автовокзал - Шахтинский автовокзал | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 45 | 122 | Автовокзал - Топарский автовокзал | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |

Продолжение таблицы 1.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|------|--|--|-----|
| 46 | 127 | Автовокзал - Шахан | ТОО "Автобусный парк №3", ТОО "Автобусный парк №5" | Да |
| 47 | 134э | Актас, центральный - Автостанция "14 микрорайон" | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 48 | 145 | Автостанция Пришахтинск - Автостанция Юго-Восток | ТОО "Автобусный парк №3", ТОО "Автобусный парк №5" | Да |
| 49 | 146 | 14-й микрорайон - Абайский автовокзал | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 50 | 165 | Автовокзал - Сарань | ТОО "Автобусный парк №3" | Да |
| 51 | 495 | Автостанция Юго-Восток - Аэропорт | ТОО "Автобусный парк №3" | Нет |

Таблица 1.5 – Количество маршрутов, проходящих через центральную часть города Караганды с распределением по перевозчикам

| Перевозчик | Количество маршрутов всего | Количество маршрутов, проходящих через центральную часть города |
|--------------------------|----------------------------|---|
| ТОО "Автобусный парк №2" | 11 | 4 |
| ТОО "Автобусный парк №3" | 31 | 20 |
| ТОО "Автобусный парк №5" | 10 | 6 |

На рисунке 1.10 представлена диаграмма количества маршрутов, проходящих через центральную часть города с распределением по перевозчикам.

ТОО «Автобусный парк №3» является самым крупным перевозчиком пассажиров в городе Караганда, осуществляющим более 60% всех пассажирских автобусных перевозок г. Караганды.

По данным ТОО «Автобусный парк №3» подвижной состав, используемый при осуществлении автобусных перевозок насчитывает 543 единицы. Подвижной состав ТОО «Автобусный парк №3» по маркам представлен в таблице 1.6

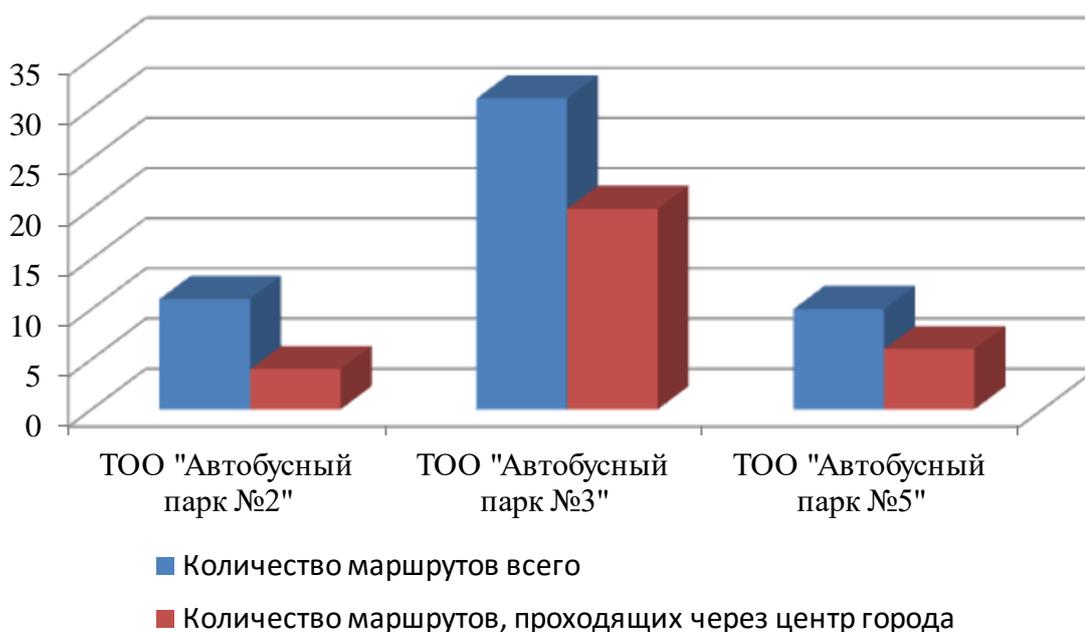
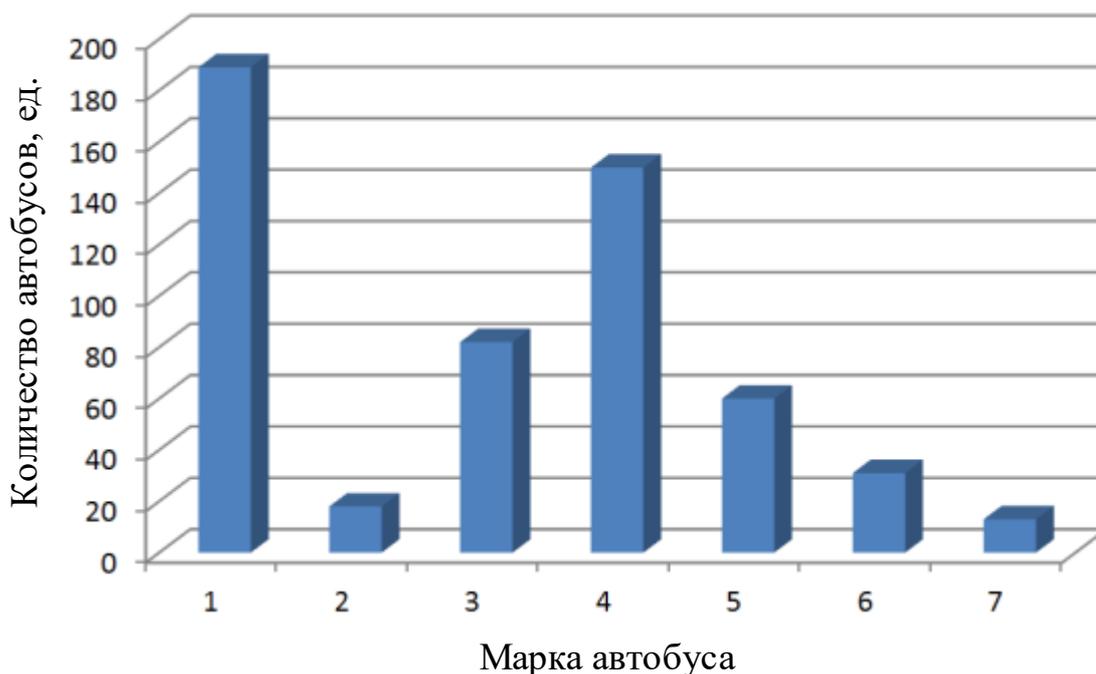


Рисунок 1.10 - Количество маршрутов, проходящих через центральную часть города Караганды с распределением по перевозчикам

Таблица 1.6 – Количество подвижного состава по маркам на ТОО «Автобусный парк №3»

| № пп | Марка автобуса | Количество | Срок эксплуатации, лет |
|------|---|------------|------------------------|
| 1 | Cobra GD 272, Yutong ZK6118HGA, Sanos-213, Sanos-S715, MAN-R07, MAN-R12, MAN-TA78 | 189 | 7,5 |
| 2 | MAN-SL 232, MAN-893, MAN-292, MAN-362H, MAN-SL 202, MAN-UEL 242, MAN-UEL 292, MAN-UEL 202, MAN-NI 202, MAN-SUE 242 | 18 | 23 |
| 3 | Setra-S-210H, Setra-211HD, Setra-215HD, Setra-315GT,HD; Setra-315GT, Setra-210H, Setra-215UL, Setra-215RL, Setra-211UL, Setra-213UL, Setra-214HD, Setra-215HR, Setra-215SL, Setra-215L, Setra-315HDH/2 | 82 | 20,8 |
| 4 | Mercedes-Benz-0303-15R, Mercedes-Benz-814D, Mercedes-Benz-O 405, Mercedes-Benz-404-15R, Mercedes-Benz-O 408, Mercedes-Benz-614D, Mercedes-Benz-O307, Mercedes-Benz-814L, Mercedes-Benz-O407, Mercedes-Benz-Ag O303-15R | 150 | 22,4 |
| 5 | Daimler-Benz-O 303-13R, Daimler-Benz-O 303-15R, Daimler-Benz-O 407, Daimler-Benz-Ag 303-13R, Daimler-Benz-Ag O 405, Daimler-Benz-814D, Daimler-Benz-Ag O 817, Daimler-Benz-O 405, Daimler-Benz-303-9R, Daimler-Benz-O 814L, Daimler-Benz-280E | 60 | 25,3 |
| 6 | ПА3-3205, ПА3-32054-07, ПА3-32053-57, ПА3-32054 | 31 | 8,8 |
| 7 | ГАЗель 3221 | 13 | 16,7 |
| | Итого: | 543 | 16,8 |

На рисунке 1.11 представлена структура подвижного состава по маркам автобусов.



1 - Cobra GD 272, Yutong ZK6118HGA, Sanos-213, Sanos-S715, MAN-R07, MAN-R12, MAN-TA78;

2 - MAN-SL 232, MAN-893, MAN-292, MAN-362H, MAN-SL 202, MAN-UEL 242, MAN-UEL 292, MAN-UEL 202, MAN-NI 202, MAN-SUE 242;

3 - Setra-S-210H, Setra-211HD, Setra-215HD, Setra-315GT,HD; Setra-315GT, Setra-210H, Setra-215UL, Setra-215RL, Setra-211UL, Setra-213UL, Setra-214HD, Setra-215HR, Setra-215SL, Setra-215L, Setra-315HDH/2;

4 - Mercedes-Benz-0303-15R, Mercedes-Benz-814D, Mercedes-Benz-O 405, Mercedes-Benz-404-15R, Mercedes-Benz-O 408, Mercedes-Benz-614D, Mercedes-Benz-O307, Mercedes-Benz-814L, Mercedes-Benz-O407, Mercedes-Benz-Ag O303-15R;

5 - Daimler-Benz-O 303-13R, Daimler-Benz-O 303-15R, Daimler-Benz-O 407, Daimler-Benz-Ag 303-13R, Daimler-Benz-Ag O 405, Daimler-Benz-814D, Daimler-Benz-Ag O 817, Daimler-Benz-O 405, Daimler-Benz-303-9R, Daimler-Benz-O 814L, Daimler-Benz-280E;

6 - ПАЗ-3205, ПАЗ-32054-07, ПАЗ-32053-57, ПАЗ-32054;

7 – ГАЗель 3221

Рисунок 1.11 – Структура подвижного состава по маркам

В городских и пригородных сообщениях, на маршрутах, проходящих через центральную часть города, из-за значительного пассажиропотока используются в основном автобусы большого класса для внутригородских перевозок марок Cobra GD 272, Yutong ZK6118HGA, Sanos 213, MAN R12, MAN Lion's City T A78. Ниже на рисунках 1.12 – 1.16 приведены внешний

вид и технические характеристики основных марок автобусов, используемых при городских и пригородных автобусных перевозках.



Модель автобуса – CobraGD 272

Пассажировместимость – 37 мест

Мощность двигателя – 290 л.с. (213 кВт)

Топливо – дизель

Экологический стандарт – Евро-4

Длина, мм – 12000

Ширина, мм – 2500

Высота, мм – 2880

Колесная база, мм – 5820

Рисунок 1.12 – Технические характеристики автобуса CobraGD 272



Модель автобуса – Yutong ZK6118HGA

Пассажировместимость, чел – 76

Мощность двигателя – 317 л.с. (233 кВт)

Топливо – дизель

Экологический стандарт – Евро-5

Длина, мм – 11690

Ширина, мм – 2500

Высота, мм – 3010

Колесная база, мм – 5800

Рисунок 1.13 - Технические характеристики автобуса Yutong ZK6118HGA



Модель автобуса – Sanos 213

Пассажировместимость – 37 мест

Мощность двигателя – 310 л.с. (228 кВт)

Топливо – дизель

Экологический стандарт – Евро-3

Длина, мм – 12000

Ширина, мм – 2500

Высота, мм – 3073

Колесная база, мм – 5820

Рисунок 1.14 - Технические характеристики автобуса Sanos 213



Модель автобуса – MAN R12

Пассажировместимость – 55 мест

Мощность двигателя – 310 л.с. (228 кВт)

Топливо – дизель

Экологический стандарт – Евро-4

Длина, мм – 12250

Ширина, мм – 2550

Высота, мм – 3400

Колесная база, мм – 6120

Рисунок 1.15 - Технические характеристики автобуса MAN R12



Модель автобуса – MAN Lion's City T A78

Пассажировместимость – 35 мест

Мощность двигателя – 280 л.с. (206 кВт)

Топливо – дизель

Экологический стандарт – Евро-4

Длина, мм – 11857

Ширина, мм – 2550

Высота, мм – 3088

Колесная база, мм – 5175

Рисунок 1.16 - Технические характеристики автобуса MAN Lion's City T A78

Наряду с относительно новыми автобусами, соответствующими экологическим нормам Евро-4 и Евро-5, в эксплуатации имеется парк автобусов, соответствующий экологическим нормам Евро-3.

Большое количество автотранспорта и самое главное городского пассажирского транспорта делает невозможным его быструю замену на новый, более экологически чистый транспорт. В связи с этим необходимо модернизировать и разработать новые системы очистки и утилизации отработавших газов, прежде всего городских автобусов.

1.4. Цели и задачи исследования

Анализ конструкций автомобильных глушителей и существующих методов очистки отработавших газов, а также возрастающие требования к снижению загрязняющих веществ в отработавших газах, особенно мелкодисперсных твердых частиц, которые нашли отражение в стандартах Евро-5 и Евро-6, вызывает необходимость поиска новых способов и конструкций дополнительных устройств очистки отработавших газов.

В связи с этим **целью исследования** является установление зависимостей, позволяющих разработать методику расчета и конструкцию накопительного устройства ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Дать сравнительный анализ конструкции автомобильных глушителей;
2. Произвести анализ способов очистки и состава отработавших газов;
3. Выбор варианта очистки и утилизации отработавших газов городских автобусов;
4. Разработать и исследовать математическую модель процесса утилизации отработавших газов ДВС;
5. Разработать экспериментальное оборудование и подтвердить полученные аналитическим путем результаты;
6. Предложить конструкцию и разработать методику расчета системы утилизации отработавших газов ДВС городских автобусов;

2. Выбор и обоснование метода утилизации отработавших газов городского автотранспорта

2.1. Сравнение вариантов очистки и утилизации отработавших газов

Как указывалось в параграфе 1.2, на автотранспортных средствах распространение получили устройства, работающие на абсорбционных, термокаталитических методах, термическом дожигании.

Опыт эксплуатации жидкостных нейтрализаторов, несмотря на то, что они успешно выполняли свои функции очистки отработавших газов от оксидов азота, оксида серы, сажи и других вредных веществ, выявил ряд существенных недостатков из-за которых эти аппараты не получили широкого распространения на транспорте. К ним относятся сложность в обслуживании, обусловленная частой сменой раствора химреагента (как правило, через каждые 8 часов работы) и периодической трудоемкой очисткой внутренних полостей от нагара и сажи (не реже одного раза в две недели); дороговизна химреагентов; нечувствительность к нейтрализации окиси углерода; затруднения, возникающие при отрицательных температурах окружающей среды из-за возможности замерзания раствора. Кроме того, аппараты жидкостной очистки имели большие вес и габаритные размеры. [15 стр. 71].

К основным недостаткам термических нейтрализаторов можно отнести следующие:

- индифферентность к окислам азота;
- в процессе пламенного дожигания одних токсичных компонентов отработавших газов в пламени образуются другие токсичные соединения;
- дополнительный расход топлива;
- сложность конструкции и относительно большие габаритные размеры нейтрализаторов;
- чувствительность к отклонениям от номинального режима работы горелки, при котором происходит увеличение содержания всех токсичных компонентов;
- неустойчивая работа аппаратов пламенного дожигания при изменении нагрузки на двигатель из-за срывов пламени. [15 стр. 76]

Независимо от типа носителя, каталитические нейтрализаторы весьма требовательны к качеству и составу топлива, техническому состоянию системы впрыска топлива, режиму эксплуатации и др. Эксплуатация на некачественном или этилированном бензине, попадание в камеру сгорания масла или антифриза, некачественные технические жидкости промывки топливной системы, переобогащенная рабочая смесь при неправильно отрегулированной системе впрыска топлива, продолжительная работа двигателя на холостом ходу – всё это приводит к тому, что за короткое время каталитический нейтрализатор выходит из строя. Он не только теряет

способность обезвреживать токсичные вещества, но и часто из-за засорения каналов и соответственно уменьшения проходного сечения происходит потеря мощности двигателя, перегрев нейтрализатора вплоть до того, что керамика может оплавиться и полностью забить проход отработавших газов. Керамическая крошка, попадая в камеру сгорания двигателя, быстро выводит его из строя.

На определенных режимах работы двигателя эффективность каталитического нейтрализатора может быть незначительной. Наиболее низкая степень очистки углеводородов и оксида углерода CO наблюдается в режиме холостого хода и на малых нагрузках. Это объясняется низкой температурой отработавших газов, недостаточной для начала реакции нейтрализации CO. [59, 60]

Основными недостатками этого метода является требовательность к качеству потребляемого топлива, низкая эффективность очистки на режиме холостого хода, характеризующегося относительно низкой температурой отработавших газов, газодинамическое сопротивление в системе выпуска газов, дороговизна катализатора и др.

Утилизация отработавших газов рассматривается в основном как рециркуляция и использование тепловой энергии отработавших газов двигателей внутреннего сгорания [61, 62]. Имеются также разработки ученых по использованию отработавших газов в сельском хозяйстве в качестве удобрения [63].

Нами предлагается устройство для ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов (рисунок 2.1), которое в отличие от применяемых фильтров не дожигает накопившиеся в процессе очистки твердые частицы, преимущественно сажи, а позволяет производить их сбор и утилизацию, а также ограничивать поступление в атмосферу отработавших газов, снижая при этом концентрацию вредных веществ в воздухе в местах наибольшего скопления транспортных средств (автобусные остановки, перекрестки и т.п.).

Устройство содержит накопительную емкость с впускным патрубком и выпускным патрубком с перепускным клапаном. В накопительной емкости смонтирован ультразвуковой генератор, в нижней части имеется отражатель звуковых волн, а поддон устройства выполнен съемным [64].

Техническим результатом является уменьшение вредных выбросов за счет фазового перехода части выхлопных газов в сажу. Технический результат достигается тем, что выхлопной газ, поступающий из глушителя через впускной патрубок 2 в накопительную емкость 1 задерживается там на время t . Это происходит за счет того, что перепускной клапан 4 перекрывает выход отработавшего газа в атмосферу и происходит наполнение ёмкости отработавшим газом, который подвергается ультразвуковой обработке.

От ультразвукового генератора 3, расположенного сверху, возникает прямая волна. На поддоне 7 емкости располагается отражатель звуковых

Колебания, действующие в двух направлениях, имеют следующие выражения перемещения частиц относительно состояния покоя [65 стр. 24, 66 стр. 26, 67]:

$$a_1 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right); \quad (2.1)$$

$$a_2 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right), \quad (2.2)$$

где a_1 и a_2 – соответственно смещение частиц при действии правой и левой волны от состояния покоя;

A – амплитуда колебаний;

t – время;

T – период колебаний;

x – направление (координата) распространения колебаний;

λ – длина волны.

Результирующее для стоячей волны выражение получим, сложив два уравнения перемещения:

$$a_{\Sigma} = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \frac{2\pi t}{T}. \quad (2.3)$$

Результирующее колебание (рисунок 2.2) обладает той же длиной волны, но не перемещается в пространстве (стоячая волна). Через каждую половину волны ($\lambda/2$) колебания отсутствуют (узлы); посередине располагаются точки пучности. [65 стр. 24, 66 стр. 26, 67]

Давление P в стоячей волне пропорционально смещению и содержит узлы и пучности. При этом положение узлов давления совпадает с положением узлов пучности и наоборот (рисунок 2.3) [65 стр. 25, 66 стр. 34, 67].

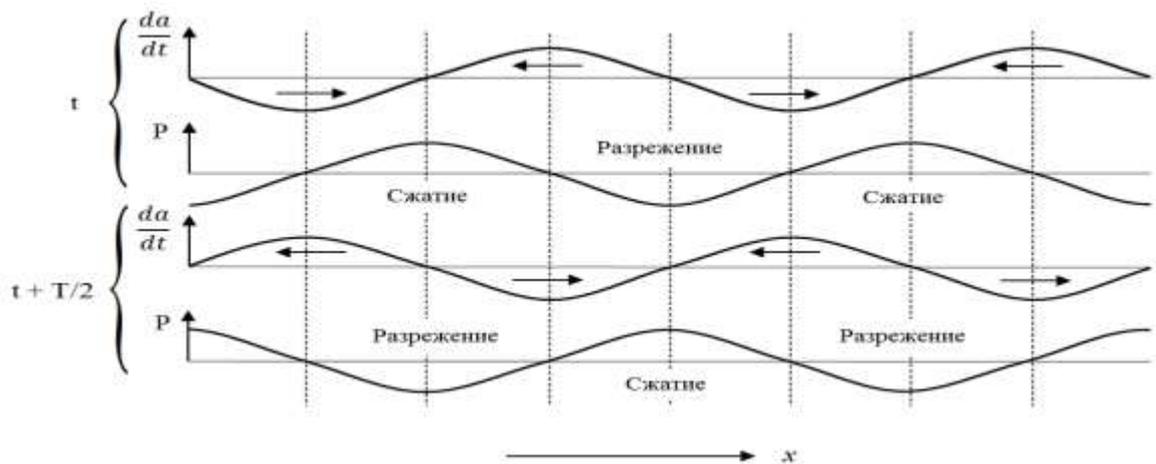


Рисунок 2.3 – Распределение скоростей da/dt и давлений P в стоячей звуковой волне.

Амплитуда давления вдвое превосходит эту величину для одиночной волны.

Для частиц газа разного размера возникает определенная частота колебаний. Вначале частицы следуют за движением газа между пучностями и узлами, при этом слипаясь и увеличиваясь в размерах. После этого частицы увеличиваются за счет хаотических колебаний.

Выхлопной газ состоит из частиц разных размеров. В зависимости от их величины и частоты колебаний частицы могут следовать за звуковыми колебаниями и коагулировать. При этом скорость коагуляционных процессов и седиментации существенно увеличивается. Для разработки математической модели ультразвуковой очистки необходимо проанализировать физику её процесса в условиях возникновения стоячей волны.

2.2. Анализ процесса очистки ультразвуком

Коагуляция (от лат. *coagulatio* — свертывание, сгущение), также флокуляция (от лат. *floculi* — клочья, хлопья) — физико-химический процесс слипания мелких частиц дисперсных систем в более крупные под влиянием сил сцепления с образованием коагуляционных структур. [68]

Согласно теории коагуляции, предложенной польским ученым М. Смолуховским в 1906 году, коагуляция происходит в результате того, что частицы дисперсной фазы, совершая броуновское движение в определенный момент сближаются на расстояние, равное радиусу сферы влияния частиц, равное сумме радиусов частиц [69]. При этом силы взаимодействия между частицами создают возможность для их слипания (агрегирования). В силу того, что вероятность столкновения сразу нескольких частиц очень мала, коагуляция происходит, как правило, между двумя частицами. Двойная частица может взаимодействовать с одинарной, двойной, тройной и т.д. частицами, в результате чего, образуются крупные агрегаты частиц, которые при достижении определенной критической массы теряют способность совершать броуновское движение и под действием силы тяжести оседают [70].

В 1938 г. ученым Гизом были проведены первые опыты ультразвуковой очистки промышленных газов, который использовал ультразвуковые свистки и магнестрикционные излучатели. Фирмой «Ультрасоник Корпорэйшн» (США) в конце пятидесятых годов были созданы газоочистительные установки с мощными ультразвуковыми сиренами. Начиная с этого времени стали проводиться научные исследования по коагуляции промышленной пыли в ряде стран, таких как СССР, Франция, Япония, Польша и др. [65 стр. 493]

Отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания является аэродисперсной системой, которая весьма чувствительна и к акустическим, и к электромагнитным воздействиям [71]. Еще во второй половине XIX века

немецкий физик А.Кундт обнаружил, что интенсивные акустические волны оказывают воздействие на мелкодисперсные частицы в газах, а Р.Кениг дал трактовку наблюдаемому явлению [72]. Наглядной иллюстрацией этого воздействия служит знаменитая «трубка Кундта».

Увеличение размеров мелкодисперсных частиц и их оседание в местах пучностей под воздействием ультразвукового излучения с частотой 34 кГц было отмечено в 1931 году учеными Паттерсоном и Кейвудом [71 стр. 133]. Дальнейшие исследования в Советском Союзе, Германии, Англии, направленные на выяснение природы явления коагуляции и седиментации частиц аэрозолей, разработку специальной аппаратуры привели к возникновению ряда гипотез о механизме возникновения коагуляции под воздействием акустических волн.

На скорость коагуляционных процессов влияет множество факторов, которые можно подразделить на две группы [71 стр. 134]:

1. Факторы, влияющие на вероятность столкновения мелкодисперсных частиц
2. Факторы, влияющие на слипание частиц при их соударении

Физические воздействия в виде электрических и акустических полей оказывают существенное влияние на движение частиц и, следовательно, на вероятность их столкновения [73].

Частицы, при определенных энергиях, получаемых при воздействии электрических и акустических полей, могут сближаться и, преодолев первый глубокий потенциальный барьер, образовывать устойчивую систему. Г.А. Мартыновым и Д.С. Лычковым этот вопрос был рассмотрен применительно к ультразвуковой коагуляции гидрозолой [74]. Таким образом, рассматриваемые воздействия могут оказывать влияние и на вторую группу факторов [71 стр. 134].

Кинетику коагуляции аэрозолей можно описать следующей экспоненциальной зависимостью [71 стр. 134]:

$$n = n_0 e^{-kt}, \quad (2.4)$$

где n и n_0 — счетные концентрации частиц аэрозоля, соответственно текущая и в начальный момент; k — коэффициент коагуляции.

Коэффициент коагуляции k зависит от физико-химических свойств аэрозоля и физических характеристик акустического поля. В своих опытах Брандт [65] исследовал акустическую коагуляцию аэрозоля парафинового масла. На аэрозоль с каплями радиусом 0,2-1,9 мкм при массовой концентрации 15-20 г/м³ воздействовали звуковые волны с частотой 10 кГц различной интенсивности. Были получены следующие зависимости [71 стр. 134]:

| | | | |
|-----------------------------------|--------|------|------|
| Интенсивность, Вт/см ² | 0,0067 | 0,06 | 0,11 |
| Коэффициент коагуляции | 0,43 | 0,92 | 1,28 |

Таким образом, с повышением интенсивности акустического воздействия, увеличивается коэффициент коагуляции и соответственно увеличивается степень и скорость коагуляционных процессов.

Помимо интенсивности, на степень и скорость акустической коагуляции влияют: время озвучивания, составляющее при интенсивностях 1 Вт/см^2 несколько секунд, частота и исходная концентрация. Процесс акустической коагуляции начинается при интенсивности выше $0,1 \text{ Вт/см}^2$; используются частоты колебаний от сотен герц до десятков килогерц, рациональная исходная концентрация должна быть больше 1 г/м^3 [71 стр. 134].

При исследовании процесса воздействия ультразвуковых колебаний на аэрозоль возникает вопрос о влиянии времени озвучивания на степень разрушения и осаждения аэрозолей. В работе [75] и последующих исследованиях установлено, что для осаждения аэрозолей достаточно 4-5 с; увеличение времени озвучивания более 30 с не усиливает эффект коагуляции.

Подробности процесса оседания частиц изучалось учеными Брандтом и Фройндом. Использованная ими установка (рисунок 2.4) позволяла микрофотографированием при освещении по методу темного поля исследовать ультразвуковую коагуляцию в газовой фазе. [65 стр. 488]

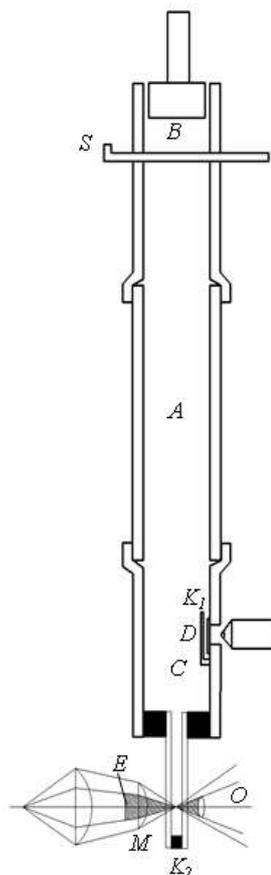


Рисунок 2.4 – Установка для исследования коагуляции в газовой фазе под действием ультразвука.

Установка состоит из трех частей А, В и С, в нижней части которой установлена камера для наблюдения К₂.

Освещение по методу темного поля обеспечивалось конденсором микроскопа М, круглой центральной диафрагмой Е и передней линзой О объектива микроскопа. В верхней части установки находится излучатель ультразвуковых волн, которые могут быть диафрагмированы заслонкой S. Для оценки времени падения седиментированных частиц служит камера К₁, со смотровым окошком D. Направление освещения при этом перпендикулярно к направлению наблюдения [65 стр. 488].

На рисунке 2.5 [65 стр. 489] представлены восемь последовательно снятых микрофотографий процесса коагуляции дыма. На снимке *а* аэрозоль не подвергается ультразвуковому воздействию и находится в исходном состоянии. На снимке *б* видны колебания частиц под начавшимся воздействием ультразвука. На снимках *в*, *г*, *д*, *е* показано укрупнение частиц и по их расположению видно, что они совершают хаотическое движение в поле зрения.

На двух последних снимках *ж* и *з* показано оседание скоагулировавших частиц после выключения ультразвука. Некоагулированные частицы остаются на месте, а слипшиеся в один агрегат и утяжеленные частицы за малое время экспозиции, составляющее четверть секунды проходят почти все поле зрения.

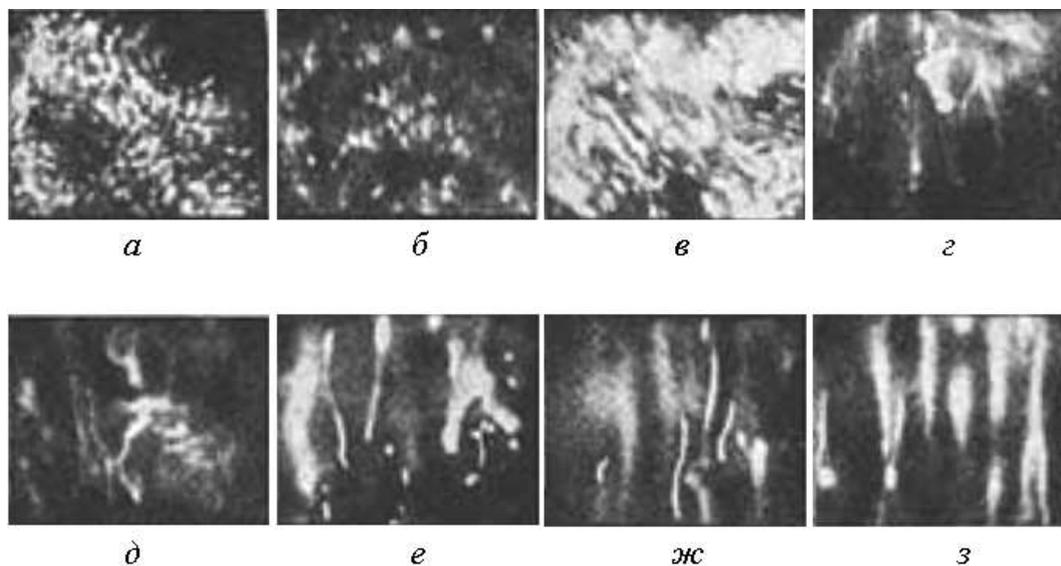


Рисунок 2.5 – Коагуляция дыма под действием ультразвука

Проведенные исследования учеными Брандтом и Гидеманом позволили дать описание механизму коагуляционных процессов, согласно которому различается две стадии коагуляции. На первой стадии небольшие по размерам и массе частицы колеблются, следуя за движением газа между пучностями и узлами колебаний и в результате взаимных столкновений и под действием сил взаимного притяжения слипаются, увеличиваясь в размерах и

массе. Достигнув определенного размерно-массового порога, частицы уже не могут быть увлечены звуковыми колебаниями, и совершают хаотичные движения, продолжая сталкиваться между собой и с меньшими частицами. В результате, размеры частиц продолжают увеличиваться [65 стр. 489].

Данные Брандта и Фройнда, представленные в таблице 2.1 говорят о сильной зависимости процесса коагуляции от интенсивности ультразвука. В процессе эксперимента варьировалась амплитуда колебаний магнитострикционного излучателя и через минуту после начала ультразвукового воздействия снимались показатели: время падения на 1 мм, сек; радиус частиц, мкм, отношение массы m_1 частиц после озвучивания к их первоначальной массе m_0 .

Таблица 2.1 – Зависимость коагуляции от амплитуды ультразвуковых волн

| Амплитуда колебаний излучателя, μ | Время падения на 1 мм, сек. | Радиус частиц, μ | Отношение масс $m_1:m_0$ |
|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------|
| 0 | 2 | 1,8 | - |
| 9 | 1,3 | 2,3 | 2,1 |
| 18 | 0,56 | 3,7 | 8,7 |
| 36 | 0,4 | 4,3 | 13,6 |
| 54 | 0,06 | 10,5 | 200 |

При наибольшей интенсивности ультразвукового воздействия, соответствующей максимальной амплитуде согласно таблице 2.1., за контрольный промежуток времени образовывается один большой агрегат, состоящий из 200 частиц, скорость оседания которого в 33 раза выше исходных частиц. Уменьшение времен падения частиц на 1 мм свидетельствует об увеличении размеров и массы частиц. Увеличение размеров частиц в результате коагуляции можно также оценить путем измерения поглощения света взвесью во время действия ультразвука [65 стр. 489].

Существует определенный верхний предел частоты, при которой частицы полностью увлекаются звуковыми колебаниями среды. Эта частота зависит от размера частиц. При повышении частоты, амплитуды колебания частиц уменьшаются. Поэтому при воздействии акустических волн в определенной оптимальной области частот, в разнородном по размерам частиц аэрозоле частицы различной величины имеют соответственно различные амплитуды колебаний, что приводит к взаимным столкновениям и коагуляции. Это так называемая ортокинетическая коагуляция. При превышении этой благоприятной для ортокинетической коагуляции области частот, частицы перестают увлекаться колебаниями среды. Коагуляция в таких условиях

происходит под действием гидродинамических сил в смысле Бьеркнеса [65 стр. 489].

При стоячей звуковой волне степень участия частицы в звуковых колебаниях среды связана с частотой колебаний и радиусом частицы следующим соотношением [65 стр. 489]:

$$\frac{X_p}{X_G} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi\rho r^2 f / 9\eta)^2 + 1}}, \quad (2.5)$$

где X_p – амплитуда колебаний частицы;

X_G – амплитуда колебаний газа;

r и ρ – соответственно радиус и плотность частицы;

f – частота колебаний;

η – коэффициент вязкости.

Чем меньше радиус частицы и чем ниже частота, тем соотношение амплитуд X_p/X_G будет больше. В этом случае, для показателя X_p/X_G величина $r^2 f$ является определяющей. На рисунке 2.6 представлена зависимость соотношения X_p/X_G от радиуса частиц r для различных частот ультразвука для воздуха ($\eta = 1,7 \cdot 10^{-4}$) и частицы с плотностью $\rho = 1$. Для большинства аэрозолей оптимальной является область частот 5 – 50 кГц [65 стр. 490].

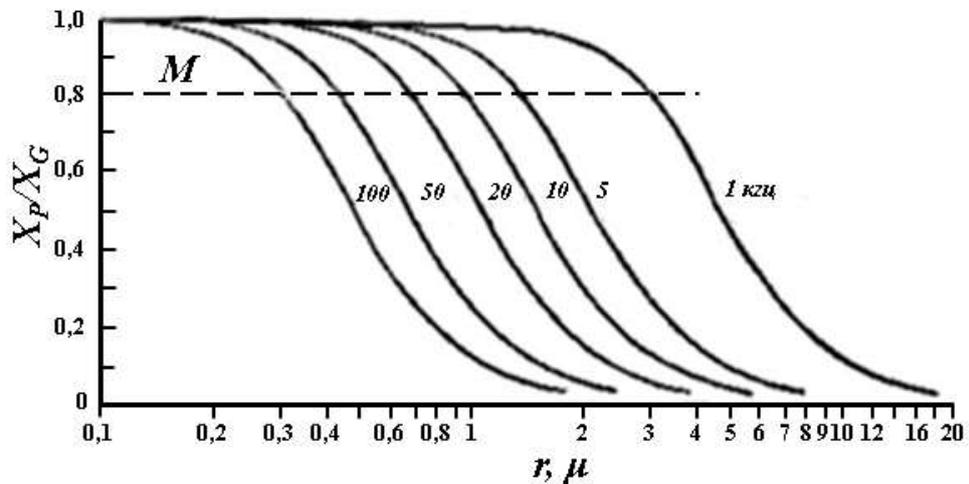


Рисунок 2.6 – Зависимость отношения амплитуд X_p/X_G от радиуса частицы r для различных частот ультразвука.

Согласно соотношению (2.2), коэффициент увлечения Z определяется выражением [65 стр. 490, 76, 77]

$$Z = \frac{\rho r^2 f}{\eta}. \quad (2.6)$$

Частицы, имеющие в данном звуковом поле одно и то же значение Z , движутся в этом поле одинаково. Как видно из графиков зависимости

отношения амплитуд X_p/X_G от радиуса частицы r для различных частот ультразвука, начиная со значения X_p/X_G , около 0,8, наклон кривых на рисунке 4.3 [65 стр. 490], достигает максимальной своей величины. И принимая это значение $X_p/X_G=0,8$ за границу, до которой частицы еще увлекаются звуковыми колебаниями, из соотношения 2.2 получим соотношение:

$$0.8 = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{4\pi}{9}Z_0\right)^2 + 1}},$$

из которого $Z_0=0,54$. Величина Z_0 , называемая критическим числом [78] определяет степень участия частиц в колебаниях газа. Для воздуха ($\eta = 1,7 \cdot 10^{-4}$) при плотности частиц $\rho = 1$ и $Z_0 = 0,54$ из выражения 2.3 получаем критическое значение $r^2 f \approx 10^{-4}$ см²/сек, которое для отдельных кривых на рисунке 3 определяется пересечением с прямой M . [65 стр. 490]

Более наглядно эти соотношения представлены на рисунке 2.7, где прямые 1 и 2 относятся соответственно к значениям коэффициента увлечения 0,8 и 0,2. По оси абсцисс откладываются значения r , по оси ординат – значения f , а в качестве параметра выбран коэффициент увлечения X_p/X_G [65 стр. 490].

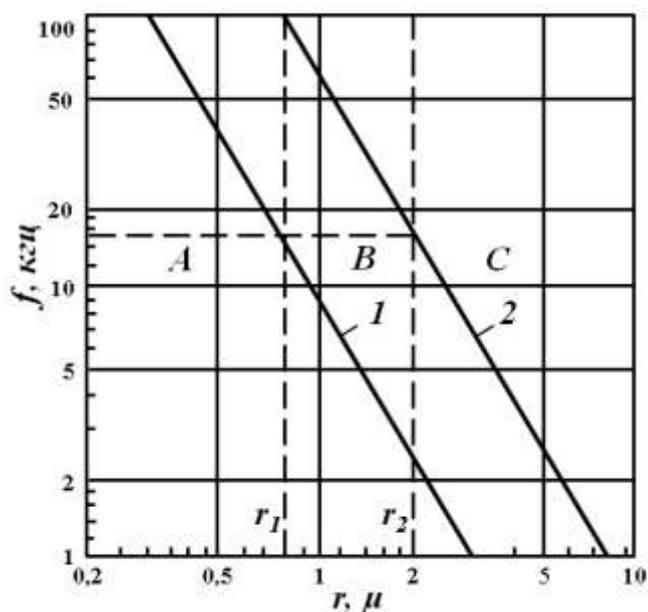


Рисунок 2.7 – Зависимость между радиусом частиц и частотой ультразвука при коагуляции для двух значений коэффициента увлечения $X_p/X_G = 0,8$ (прямая 1) и $X_p/X_G = 0,2$ (прямая 2).

На рисунке 2.7. прямыми 1 и 2 образуются три зоны – А, В и С. Наиболее благоприятная для коагуляционных процессов является область В, в которой частицы колеблются в соответствии со своими размерами с самыми различными амплитудами, тогда как в области С все частицы практически покоятся, а в области А все частицы полностью увлекаются газом. Таким образом, например, для аэрозоля с радиусом частиц 0,8 – 2 мкм

наилучшее коагулирующее действие будут оказывать ультразвуковые волны с частотой около 16 кГц. [65 стр. 491]

Давление, оказываемое звуковыми волнами на маленькие частицы, также способствуют коагуляционным процессам [79]. На маленький шарик радиусом r в стоячей звуковой волне действует сила [80], которая обусловлена давлением звука, определяемая как [65 стр. 491]:

$$S = \frac{10 \pi r}{3 \lambda} \bar{E} \sin(2kx), \quad (2.7)$$

где \bar{E} – плотность энергии волны и $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Отсюда сила, действующая на частицу [22]

$$K = \frac{10 \pi^2 r^2}{3 \lambda} \bar{E} \sin(2kx), \quad (2.8)$$

В узлах и пучностях колебаний эта сила равна нулю и достигает максимального значения между ними. Под действием волнового давления, так как сила K по обе стороны от пучности направлена к пучности, частицы перемещаются в пучности колебаний. В этом случае уравнение движения для одной частицы определяется как [65 стр. 492]:

$$\frac{10 \pi^2 r^2}{3 \lambda} \bar{E} \sin(2kx) = 6\pi \eta r \frac{dx}{dt}.$$

Проинтегрировав это уравнение получим следующую зависимость [65 стр. 492]:

$$tg(kx) = e^{Bt} tg(kx_0) \quad (2.9)$$

где x_0 - координата частицы в момент времени $t=0$, $B = \frac{20 \pi^2 r^2 E}{9 \lambda^2 \eta}$

Рассчитав для идеального аэрозоля, диаметр частиц которого составляет 1 мкм, распределение относительной плотности частиц в различные моменты времени при ультразвуковом поле частотой 10 кГц и плотностью энергии 1000 эрг/см³ при коэффициенте вязкости $\eta=1,85 \cdot 10^{-4}$ можно увидеть (рисунок 2.8), что под воздействием давления ультразвука частицы группируются в пучностях колебаний стоячей ультразвуковой волны, где они и продолжают коагулировать друг с другом. [65 стр. 492]

Опыты, проведенные Клэрмом по осаждению хлористого аммония плотностью 2 мг/л и выявленные при этом зависимости (рисунок 2.9) [81] показывают, насколько сильно зависит коагуляция частиц от мощности звукового излучения. Чем больше интенсивность звука, тем за более

короткое время можно достичь той же степени коагуляции, что и при малой интенсивности за длительное время. [65 стр. 493]

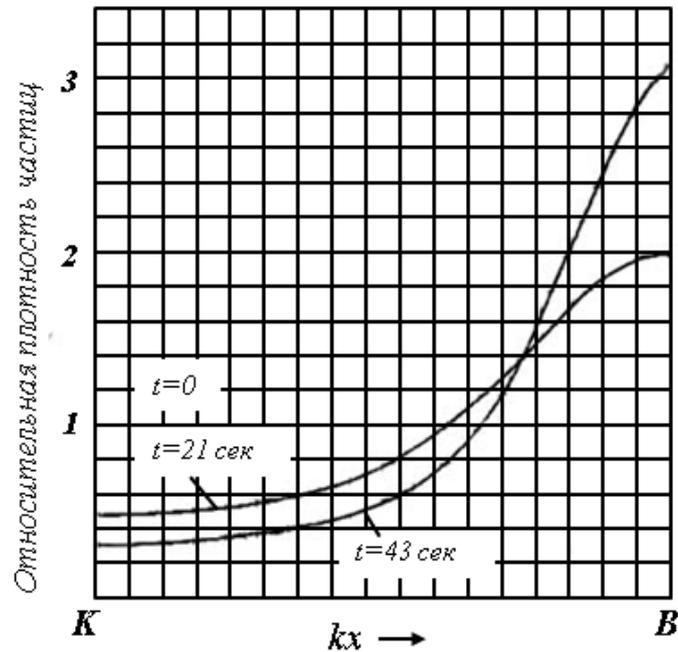


Рисунок 2.8 – Распределение относительной плотности частиц в стоячей звуковой волне между узлами (К) и пучностями (В) колебаний под действием волнового давления звука для различных моментов времени.

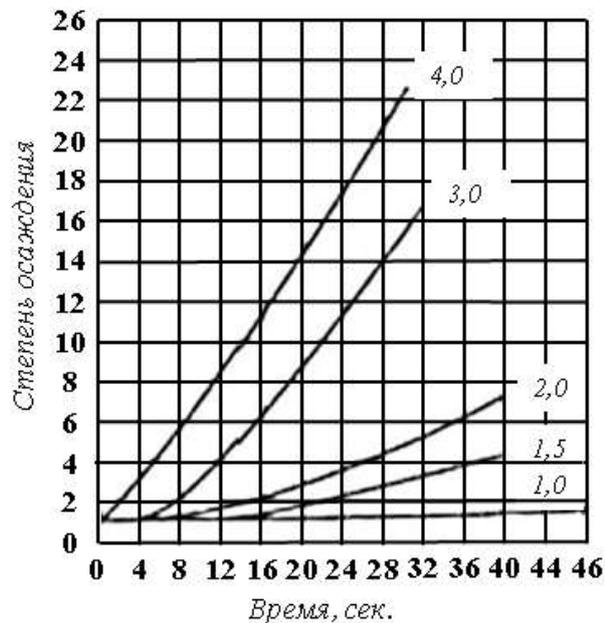


Рисунок 2.9 – Зависимость степени осаждения тумана хлористого аммония от времени облучения при различных мощностях ультразвука.

Коагуляция частиц начинается при интенсивности звука $0,15 \text{ Вт/см}^2$, однако для того, чтобы скорости газа и размеры аппаратов соответствовали допустимым в технических установках, требуются интенсивности звука не

менее 1 Вт/см^2 и продолжительности нахождения частиц в звуковом поле не менее 4 сек. [65 стр. 492]

Эффективность ультразвуковой коагуляции зависит от концентрации частиц. Это подтверждается зависимостью, выведенной Киду на основе расчета Вивиана и Стокса, между степенью коагуляции E , числом G частиц в 1 см^3 и временем облучения t звуком с интенсивностью J [82]:

$$\lg(100 - E) = \frac{k}{Gt\sqrt{J}} \quad (2.10)$$

здесь k – постоянная, зависящая от частоты, природы частиц и используемой аппаратуры [65 стр. 493].

Акустическое воздействие может быть использовано для коагуляции тумана кислоты, очистки выхлопных газов от соединений фтора, сажи и т. п.

2.2. Математическое моделирование процесса утилизации отработавших газов двигателя внутреннего сгорания

Процесс коагуляции ускоряется при воздействии ультразвука, который оказывает диспергирующее действие на эмульсии и жидкие золи, а на аэрозоли (дым, туман, пыль) оказывает коагулирующее действие [83].

Первый процесс происходит при низких частотах колебаний. При повышении частоты колебаний существует оптимальный отрезок частот, при котором частицы различной величины имеют разную амплитуду, сталкиваются друг с другом и коагулируют. Такого рода коагуляция называется ортокинетической. При повышении частоты коагуляция становится гидродинамической и осуществляется за счет трения. Этот процесс описывается уравнениями Бьеркнеса [65 стр. 489, 84 стр. 125, 85].

Степень участия частицы в звуковых колебаниях в случае стоячей звуковой волны связана с частотой колебаний, радиусом частицы и вязкости среды и описывается следующим соотношением [65 стр. 489]:

$$\frac{U_{\text{ч}}}{U_{\text{г}}} = \frac{1}{[(4\pi\rho r^2 f/9\eta)^2 + 1]^{1/2}}, \quad (2.11)$$

где $U_{\text{ч}}$, $U_{\text{г}}$ – соответственно амплитуды колебаний частицы и газа;

ρ – плотность частицы;

r – радиус частицы;

f – частота колебаний газа под действием ультразвука;

η – динамическая вязкость.

Это уравнение получено из закона Стокса [65 стр. 489] и отражает гидродинамическую коагуляцию.

Отношение амплитуд будет тем меньше, чем выше частота и больше радиус частиц. Поэтому, в зависимости для степени участия частицы в колебаниях газа, определяющей является величина $r^2 f$. Принято коэффициент увлечения определять выражением 2.6 [65 стр. 490]:

Процесс коагуляции для предлагаемого нами устройства описывается следующими зависимостями.

При включении ультразвукового генератора:

$$t = 0; PV = \text{const}; P = \text{const}; V = \text{const}; \rho = \text{const}; m = m_0,$$

где t – время; P – давление; V – объем; ρ – плотность; m – масса; m_0 – начальная масса.

При работе ультразвукового генератора:

$$t > 0; V = \text{const}; P = \tilde{P}(\rho, m); m = \tilde{m}(t).$$

В качестве модели коагуляции принята экспоненциальная зависимость кинетики коагуляции, описываемая формулой 2.4 [71 стр. 134]:

Сделаем предположение, что средняя концентрация молекул газа и сажи прямо пропорциональна их массам и обратно пропорциональна занимаемому объему. Тогда общая масса в емкости (m_0) будет складываться из массы газа (m_r) и массы сажи (m_c).

$$m_0 = nm_c + (1 - n)m_r. \quad (2.12)$$

Исходя из уравнений (2.13) и (2.14) получим:

$$\frac{m_r}{V} = \frac{m_0}{V} e^{-kt}, \quad (2.13)$$

так как $m_c = m_0 - m_r$, то:

$$m_c = m_0 - m_0 e^{-kt} = m_0(1 - e^{-kt}). \quad (2.14)$$

Определим давление в зависимости от массы, как:

$$P = \frac{mg}{S}, \quad (2.15)$$

где S – площадь.

С учетом массы газа

$$P = \frac{m_0 e^{-kt}}{S} g. \quad (2.16)$$

Плотность газа и сажи с учетом их объемов будет равна:

$$\rho_r = \frac{m_0 e^{-kt}}{V}; \quad (2.17)$$

$$\rho_c = \frac{m_0(1 - e^{-kt})}{V_c}. \quad (2.18)$$

Величина коэффициента увлечения определится выражением

$$Z = \frac{m_0 e^{-kt} r^2 f}{\eta}. \quad (2.19)$$

Из зависимости (2.4) коэффициент коагуляции определяется как:

$$k = -\frac{\ln \frac{n}{n_0}}{t}, \quad (2.20)$$

Подставив формулу 2.20 в формулу 2.14 получим:

$$m_c = m_0 \left(1 - e^{-\frac{\ln \frac{n}{n_0}}{t} t} \right) = m_0 \left(1 - e^{-\ln \frac{n}{n_0}} \right) = m_0 \left(1 - \frac{n}{n_0} \right). \quad (2.21)$$

Как видно из формулы 2.21 масса осаждаемой сажи m_c находится в прямой пропорциональной зависимости от m_0 , а также зависит от соотношения $\frac{n}{n_0}$, определяющее коэффициент коагуляции.

2.3. Анализ математической модели процесса утилизации отработавших газов

Масса скоагулированной и осевшей сажи, определяемая по формуле (2.21) зависит от общей массы газа и сажи, коэффициента коагуляции (2.20), который в свою очередь зависит от соотношения счетных концентраций твердых частиц в текущий и начальный моменты времени.

В таблице 2.2 приведены данные зависимости коэффициента коагуляции k от времени при различных соотношениях счетных концентраций частиц газа n/n_0 .

Таблица 2.2 – Зависимость коэффициента коагуляции k от времени при различных соотношениях счетных концентраций частиц газа n/n_0

| t, с n/n ₀ | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 | 600 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 0,1 | 0,038 | 0,019 | 0,013 | 0,010 | 0,008 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,004 |
| 0,2 | 0,027 | 0,013 | 0,009 | 0,007 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| 0,3 | 0,020 | 0,010 | 0,007 | 0,005 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,002 |

Продолжение таблицы 2.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,4 | 0,015 | 0,008 | 0,005 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| 0,5 | 0,012 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 0,6 | 0,009 | 0,004 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 0,7 | 0,006 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 0,8 | 0,004 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,9 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

График зависимости коэффициента коагуляции k от времени при различных соотношениях счетных концентраций частиц газа в текущий момент времени к счетной концентрации частиц газа в начальный момент времени n/n_0 представлен на рисунке 2.10.

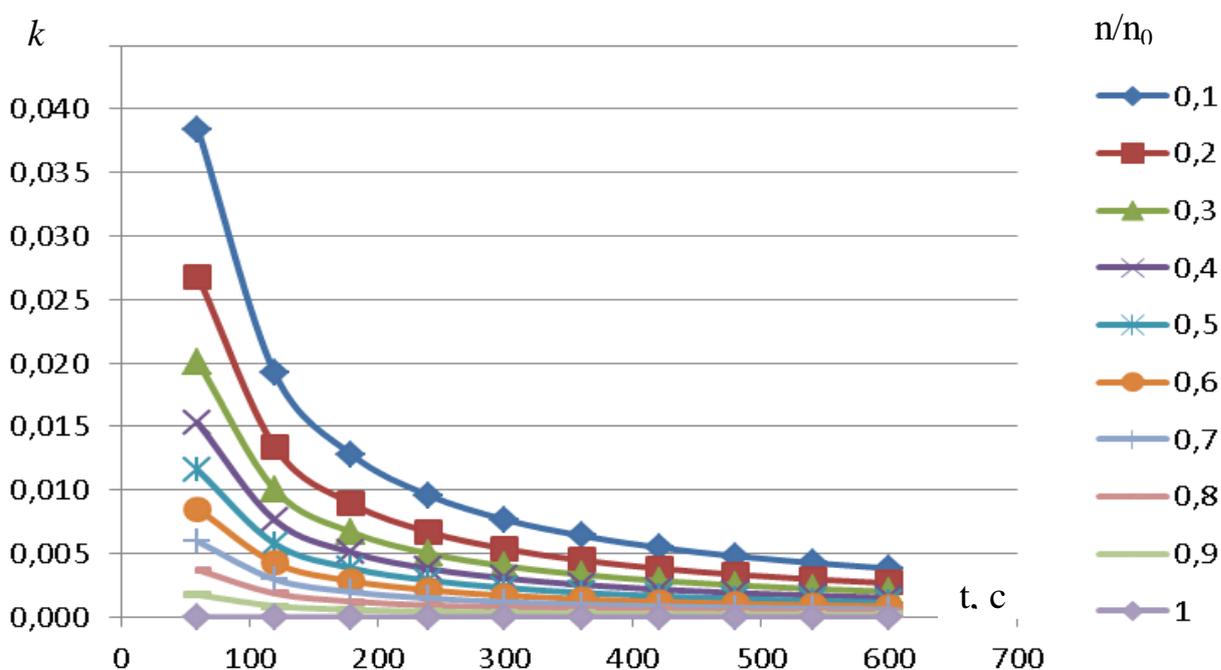


Рисунок 2.10 Зависимость коэффициента коагуляции k от времени t при различных соотношениях счетных концентраций частиц газа n/n_0

В таблице 2.3 приведены данные зависимости массы осаждаемых при коагуляции твердых частиц сажи от отношения их счетных концентраций для различных значений m_0 .

График зависимости массы осаждаемых при коагуляции твердых частиц сажи от отношения их счетных концентраций для различных значений m_0 представлен на рисунке 2.11

Таблица 2.3 – Масса осаждаемых при коагуляции твердых частиц сажи в зависимости от отношения их счетных концентраций n/n_0 для различных значений m_0

| | Отношение счетных концентраций частиц газа n/n_0 | | | | | | | | | |
|----|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| 1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| 2 | 1,8 | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0 |
| 3 | 2,7 | 2,4 | 2,1 | 1,8 | 1,5 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 0,3 | 0 |
| 4 | 3,6 | 3,2 | 2,8 | 2,4 | 2 | 1,6 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0 |
| 5 | 4,5 | 4 | 3,5 | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 | 0 |
| 6 | 5,4 | 4,8 | 4,2 | 3,6 | 3 | 2,4 | 1,8 | 1,2 | 0,6 | 0 |
| 7 | 6,3 | 5,6 | 4,9 | 4,2 | 3,5 | 2,8 | 2,1 | 1,4 | 0,7 | 0 |
| 8 | 7,2 | 6,4 | 5,6 | 4,8 | 4 | 3,2 | 2,4 | 1,6 | 0,8 | 0 |
| 9 | 8,1 | 7,2 | 6,3 | 5,4 | 4,5 | 3,6 | 2,7 | 1,8 | 0,9 | 0 |
| 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |

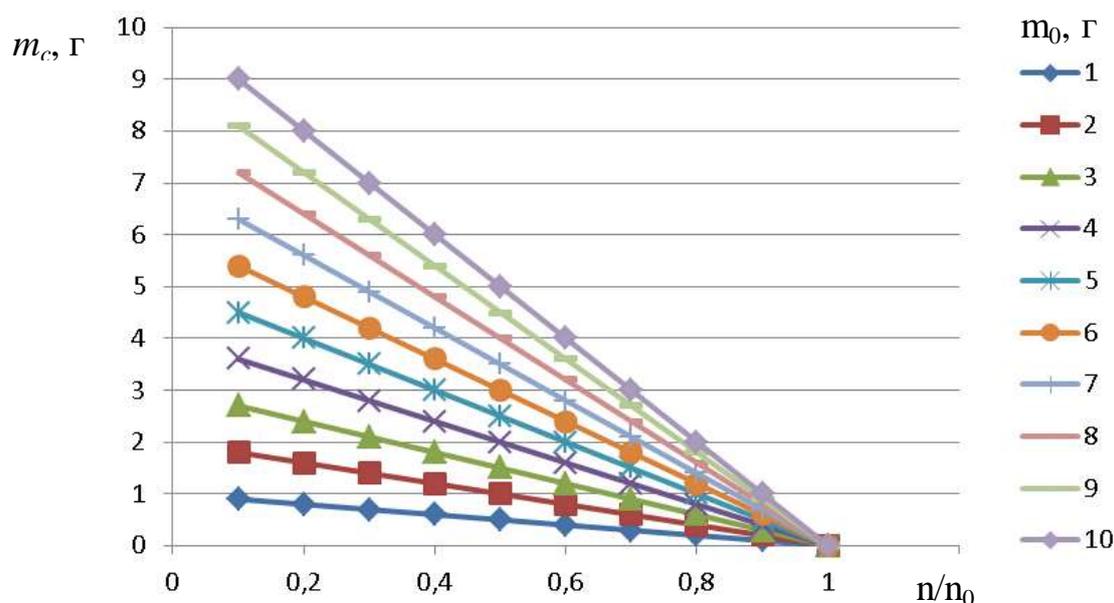


Рисунок 2.11. Зависимость массы осаждаемых при коагуляции твердых частиц сажи от отношения их счетных концентраций для различных значений m_0

Светопропускная способность или прозрачность некоторого объема выхлопного газа зависит от концентрации содержащихся в нем твердых частиц, преимущественно сажи, находящихся во взвешенном состоянии.

После закачки газа в определенный объём будет происходить снижение прозрачности из-за наличия во взвешенном состоянии сажевых и других твердых частиц, обладающих светопоглощающей способностью. С течением времени светопропускная способность выхлопного газа повышается, а светопоглощающая способность снижается из-за уменьшения концентрации

сажи во взвешенном состоянии вследствие осаждения частиц сажи на дно устройства в результате коагуляционных процессов.

Изменение прозрачности некоторого объема выхлопного газа в i -й промежуток времени можно оценить по изменению светового потока, проходящего через объём выхлопного газа. Для этого предлагается использовать коэффициент прозрачности газа α_i , определяемый как отношение показателя освещенности E после закачки газа в i -й промежуток времени к показателю освещенности до закачки газа, т.е.:

$$\alpha_i = \frac{E_i}{E_{\text{исх}}}, \quad (2.22)$$

где $i = 1 \dots 10$.

Тогда светопоглощающая способность оценивается коэффициентом поглощения светового потока β , определяемого как:

$$\beta_i = 1 - \alpha_i, \quad (2.23)$$

где α_i – коэффициент прозрачности газа в i -ый промежуток времени

Допуская, что n и n_0 – счетные концентрации частиц газа, соответственно текущие и в начальный момент, пропорциональны степени поглощения светового потока β , коэффициент коагуляции определяется по формуле:

$$k_i = -\frac{\ln \frac{\beta_i}{\beta_{i-1}}}{t}, \quad (2.24)$$

где $i = 1 \dots 10$;

t - промежуток времени между снятиями показаний, с. $t = 60$ с.

Опираясь на гипотезу тесной корреляции между коагуляцией и степенью прозрачности газа приравняем зависимости (2.20) и (2.24):

$$-\frac{\ln(1 - \frac{m_c}{m_0})}{t} = -\frac{\ln \frac{\beta_i}{\beta_{i-1}}}{t} \quad (2.25)$$

Откуда

$$m_c = m_0 \left(1 - \frac{\beta_i}{\beta_{i-1}}\right) \quad (2.26)$$

Или

$$m_c = m_0 \left(1 - \frac{1 - \alpha_i}{1 - \alpha_{i-1}}\right) = m_0 \left(1 - \frac{1 - \frac{E_i}{E_{\text{исх}}}}{1 - \frac{E_{i-1}}{E_{\text{исх}}}}\right) \quad (2.27)$$

Таким образом, зная величину m_0 , которую можно определить по объему емкости и плотности газа, для определения величины m_c необходимо определить отношение $\frac{\beta_i}{\beta_{i-1}}$ через соответствующие показатели освещенности, для определения которых необходимо экспериментальное подтверждение взаимосвязи степени прозрачности и коэффициента коагуляции.

3. Экспериментальное исследование ультразвуковой коагуляции твердых частиц отработавших газов двигателей внутреннего сгорания

3.1 Цель и задачи эксперимента

Проводимые нами эксперименты согласно классификации, изложенной в литературе [86, 87, 88] по способу формирования условий являются естественными и искусственными. При проведении эксперимента в естественных условиях наблюдается коагуляция и седиментация частиц без ультразвукового воздействия, а в искусственных условиях – под воздействием ультразвука.

По целям исследования эксперименты классифицируются как констатирующие, преобразующие и поисковые, а по организации проведения – лабораторные, так как проводятся в лабораторных условиях с применением типовых приборов на экспериментальном оборудовании.

По структуре изучаемых объектов и явлений эксперименты являются простыми. Определяется скорость коагуляционных процессов, характеризуемой освещенностью от времени.

Целью проводимого нами эксперимента является получение данных подтверждающих теорию очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания путем коагуляции и осаждения частиц газа под действием ультразвука.

Задачи эксперимента:

- создание экспериментальной установки, обеспечивающей необходимые условия ультразвуковой коагуляции и седиментации частиц выхлопного газа двигателя;
- определение контролируемых факторов и параметров, определяющих условия протекания процесса коагуляции, изменяемых в процессе эксперимента;
- определение количественных и качественных показателей, определяющих исследуемый процесс;
- подбор оборудования и измерительной аппаратуры;
- разработка методики проведения эксперимента;
- получение экспериментальных данных

3.2 Оборудование и измерительная аппаратура

Для проведения экспериментов нами была создана экспериментальная установка ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов (рисунок 3.1) [89]. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.2. Установка состоит из светопропускающего корпуса 1, впускного 8 и выпускного 4 патрубка с вентилем 5, ультразвукового излучателя 2 и генератора 3, отражателя ультразвуковых волн 7.

В качестве светопропускающего корпуса использовалась ёмкость из полиэтилентерефталата, характеризующегося прозрачностью, хорошей химической стойкостью и высокой степенью ударопрочности и прочностью на разрыв, состоящей из верхней и нижней частей. В верхней части корпуса закреплен излучатель ультразвуковых волн (рисунок 3.3), соединенный проводами с генератором ультразвуковых колебаний (рисунок 3.4). Технические характеристики ультразвукового оборудования представлены в таблице 3.1.

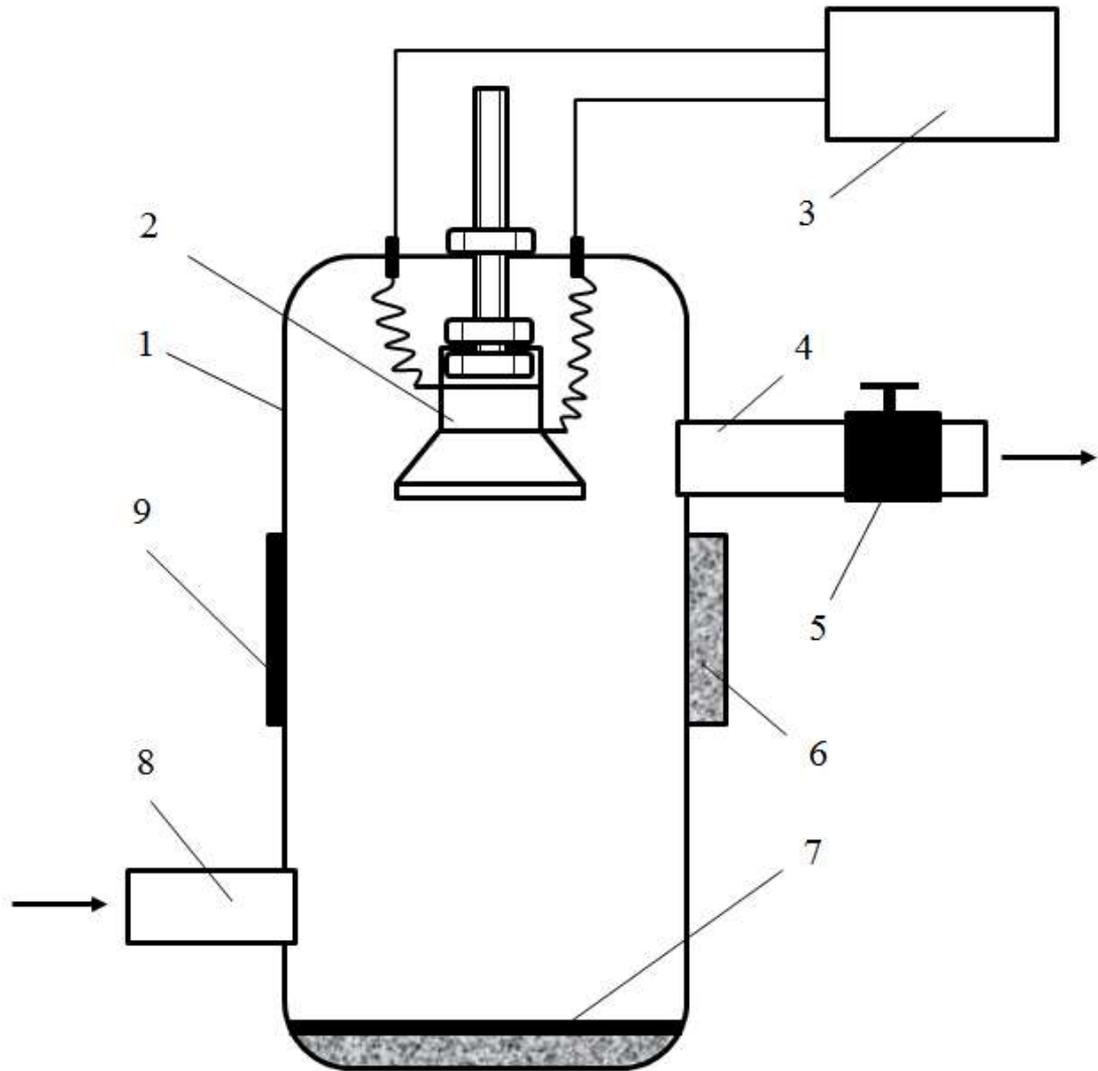
Таблица 3.1 – Технические характеристики ультразвукового оборудования

| Показатели | Значение |
|------------------------------|----------|
| Частота, кГц | 28 |
| Напряжение платы, В | 220 |
| Мощность платы, Вт | 100 |
| Мощность преобразователя, Вт | 60 |

На дне в нижней части корпуса установлен отражатель ультразвуковых волн. В качестве отражателя ультразвуковых волн использовалась керамическая плитка, поверхность которой обладает хорошими звукоотражающими свойствами.



Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС



1 – корпус; 2 – излучатель ультразвуковых волн; 3 – генератор ультразвуковых колебаний; 4 – выпускной патрубок; 5 – вентиль; 6 – источник света; 7 – отражатель ультразвуковых волн; 8 – впускной патрубок; 9 – люксметр

Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов



Рисунок 3.3 – Излучатель ультразвуковых волн (ультразвуковой преобразователь)



Рисунок 3.4 – Генератор ультразвуковых колебаний

Прозрачность внутренней среды устройства зависит от концентрации сажевых частиц. Изменение прозрачности говорит об изменении концентрации сажи в отработавшем газе, обусловливаемым осаждением частиц сажи на дно устройства.

Зафиксировать изменение прозрачности можно при помощи любого прибора, реагирующего на изменение освещенности, например люксметра и источника света, расположив их на противоположных сторонах устройства.

Для проведения эксперимента в качестве люксметра 9 (рисунок 3.2) используется смартфон, оснащенный датчиком освещенности и установленным программным обеспечением Lux Meter v18.12.09, позволяющий фиксировать значения освещенности (lx) и его изменения. Поскольку датчик смартфона располагается на лицевой стороне и, при закреплении его на стенке камеры, отображение результата становится недоступным, на смартфон было установлено программное обеспечение QuickSupport 14.3.178 QS, позволяющее отображать содержимое экрана на другом смартфоне или компьютере. На противоположной стороне был закреплен источник света 6 – светодиодный фонарь. Вся конструкция должна быть помещена в светонепроницаемый короб для устранения влияния на результаты изменения внешнего освещения. При постоянстве светового потока, освещенность, замеряемая прибором, зависит от степени прозрачности, которая в свою очередь определяется концентрацией сажевых частиц в отработавшем газе внутри установки.

Установка наполняется отработавшим газом через впускной патрубок 8, который в свою очередь присоединяется к выхлопной трубе ДВС автобуса.

На рисунке 3.5 показано подключение экспериментальной установки ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов к ДВС экспериментального стенда для исследования изоляции отработавших газов дизельного двигателя.



Рисунок 3.5 – Подключение экспериментальной установки к ДВС

На выпускном патрубке 4 установлен вентиль 5, который перекрывается после наполнения установки отработавшим газом. Под действием ультразвуковых волн, создаваемых ультразвуковым генератором 3 и излучателем 2, в выхлопном газе интенсифицируются процессы коагуляции сажевых частиц, в результате чего, частицы сажи укрупняются в размерах и массе и оседают на поверхности отражателя ультразвуковых волн 7 (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Отражатель ультразвуковых волн после работы экспериментальной установки ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов

Наличие на отражателе особо крупных осевших сажевых частиц является свидетельством слипания крупных, не увлекаемых ультразвуковыми волнами сажевых частиц в результате гидродинамической коагуляции.

Очищенный выхлопной газ выходит в атмосферу через выпускной патрубок 4 после открытия вентиля 5.

3.3 Определение числа опытов, план и методика эксперимента

Методика эксперимента заключается в определении зависимости освещенности, характеризующей степень прозрачности объема отработавшего газа, находящегося в накопительной ёмкости устройства, которая в свою очередь характеризует концентрацию сажевых частиц, находящихся во взвешенном состоянии от времени. Эксперименты проводились в два этапа: 1 этап – без включения ультразвукового генератора, 2 этап – с включенным ультразвуковым генератором. Кроме того, на подготовительном этапе производился замер начальной освещенности без закачки отработавшего газа в экспериментальное устройство $E_{исх}$, которое составило 140 лк. Устройство заполнялось отработавшим газом до снижения измеряемой освещенности со 140 до 60 лк. Снятие показаний производилось с периодичностью 1 минута в течение 10 минут. Причем, для повышения точности результатов, показания снимались в 10-секундном интервале в течение 5 секунд до и 5 секунд после каждого промежутка времени и находилось среднее значение из 11 показаний. План эксперимента представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – План эксперимента

| Этапы | Операции |
|-----------------------|--|
| 1 | 2 |
| Подготовительный этап | 1. Подсоединить экспериментальное устройство ультразвуковой очистки к выхлопному патрубку ДВС |
| | 2. Закрепить на устройстве излучатель света и люксметр друг напротив друга, |
| | 3. Подсоединить, но не включать ультразвуковой генератор к ультразвуковому излучателю, установленному в экспериментальном устройстве |
| | 4. Накрыть устройство светонепроницаемым коробом |
| | 5. Произвести замер начальной величины освещенности до закачки выхлопного газа в ёмкость устройства |

Продолжение таблицы 3.2

| 1 | 2 |
|--------|--|
| 1 этап | 6. Произвести закачку ёмкости экспериментального устройства выхлопным газом до снижения величины освещенности до 60 lx |
| | 7. Произвести замер освещенности с периодичностью 1 минута в интервале ± 5 секунд от контрольной точки в течение 10 минут |
| | 8. Произвести обработку полученных результатов |
| 2 этап | 9. Произвести закачку ёмкости экспериментального устройства выхлопным газом до снижения величины освещенности до 60 lx |
| | 10. Включить ультразвуковой генератор |
| | 11. Произвести замер освещенности с периодичностью 1 минута в интервале ± 5 секунд от контрольной точки в течение 10 минут |
| | 12. Произвести обработку полученных результатов |

Полученные предварительные результаты двух этапов экспериментов приведены в таблицах 3.3, 3.4. [90]

Таблица 3.3 – Значения показателя освещенности E , lx, без ультразвукового воздействия

| № пок азан ий | Время замера, с | | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 | 600 |
| 1 | 62 | 69 | 74 | 77 | 77 | 81 | 81 | 85 | 87 | 83 |
| 2 | 60 | 73 | 70 | 75 | 80 | 79 | 81 | 84 | 83 | 84 |
| 3 | 65 | 73 | 75 | 77 | 76 | 78 | 76 | 81 | 84 | 85 |
| 4 | 68 | 69 | 70 | 77 | 79 | 78 | 81 | 80 | 80 | 84 |
| 5 | 70 | 72 | 71 | 76 | 73 | 80 | 84 | 82 | 79 | 85 |
| 6 | 66 | 76 | 75 | 75 | 79 | 78 | 78 | 82 | 88 | 88 |
| 7 | 64 | 69 | 74 | 74 | 75 | 81 | 77 | 81 | 83 | 85 |
| 8 | 69 | 67 | 72 | 75 | 75 | 79 | 82 | 82 | 82 | 87 |
| 9 | 68 | 68 | 74 | 73 | 74 | 78 | 79 | 81 | 88 | 84 |
| 10 | 64 | 70 | 73 | 74 | 80 | 78 | 79 | 82 | 81 | 82 |
| 11 | 66 | 69 | 71 | 79 | 75 | 78 | 80 | 86 | 85 | 83 |

Таблица 3.4 – Значения показателя освещенности E , lx, с ультразвуковым воздействием

| № пок азан ий | Время замера, с | | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 | 600 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 81 | 86 | 94 | 100 | 107 | 111 | 115 | 115 | 116 | 119 |
| 2 | 83 | 93 | 95 | 101 | 104 | 108 | 112 | 115 | 115 | 119 |

Продолжение таблицы 3.4

| | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 3 | 75 | 89 | 99 | 100 | 106 | 106 | 110 | 114 | 117 | 119 |
| 4 | 79 | 89 | 95 | 103 | 104 | 110 | 112 | 117 | 117 | 118 |
| 5 | 76 | 92 | 92 | 100 | 103 | 109 | 110 | 116 | 118 | 117 |
| 6 | 79 | 92 | 92 | 101 | 105 | 106 | 113 | 116 | 120 | 121 |
| 7 | 78 | 95 | 96 | 98 | 106 | 108 | 113 | 114 | 119 | 117 |
| 8 | 83 | 84 | 97 | 100 | 108 | 107 | 111 | 113 | 120 | 121 |
| 9 | 79 | 90 | 96 | 99 | 103 | 107 | 113 | 117 | 118 | 123 |
| 10 | 81 | 91 | 96 | 102 | 106 | 113 | 113 | 116 | 121 | 124 |
| 11 | 86 | 88 | 94 | 104 | 105 | 113 | 116 | 118 | 117 | 118 |

Полученные результаты экспериментов были обработаны методами математической статистики [91, 92, 93].

Средняя арифметическая величина выборки (математическое ожидание) определяется по формуле:

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i, \quad (3.1)$$

где E_i – результат i -го измерения;

n – предварительно задаваемое число измерений.

Результаты вычислений приведены в таблицах 3.5 и 3.6.

Дисперсия измеряемой величины:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{(E_i - \bar{E})^2}{n - 1}. \quad (3.2)$$

Критерии согласия асимметрия A и эксцесс K распределения измеряемой величины, по которым производится оценка гипотезы нормальности распределения, определяются по формулам 3.3 и 3.4 соответственно:

$$|A| = \frac{|\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^3|}{n S^3}; \quad (3.3)$$

$$|K| = \frac{|\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^4 - 3|}{n S^4}, \quad (3.4)$$

где A и K – соответственно асимметрия и эксцесс распределения измеряемой величины;

S – среднее квадратичное отклонение, $S = \sqrt{D}$.

Результаты вычислений приведены в таблицах 3.5 и 3.6.

Поскольку выборочная асимметрия и эксцесс являются случайными величинами, то для их оценки определяются дисперсии:

$$D(A) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}; \quad (3.5)$$

$$D(K) = \frac{24(n-1)(n-3)n}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}; \quad (3.6)$$

где $D(A)$ и $D(K)$ – соответственно дисперсии асимметрии и эксцесса.

Применительно к нашим исследованиям:

$$D(A) = \frac{6(11-1)}{(11+1)(11+3)} = 0,357$$

$$D(K) = \frac{24(11-1)(11-3)11}{(11+1)^2(11+3)(11+5)} = 0,655$$

Критерии согласия записываются в виде неравенств:

$$A \leq 3\sqrt{D(A)}; \quad (3.7)$$

$$K \leq 3\sqrt{D(K)}. \quad (3.8)$$

То есть

$$A \leq 1,793; K \leq 2,428.$$

Результаты расчетов приведены в таблицах 3.4, 3.5.

По всем интервалам выборочная асимметрия A и эксцесс K (таблицы 3.4 и 3.5) удовлетворяют этим неравенствам. Таким образом, распределение измеряемых величин E в каждом интервале является нормальным.

Количество параллельных опытов N для каждого интервала значений освещенности E , исходя из условия нормального закона распределения исследуемого параметра и обеспечения допустимой величины погрешности измерений, определяется из выражения:

$$N = \left(\frac{t W}{\varepsilon} \right)^2, \quad (3.9)$$

где t – коэффициент Стьюдента, выбирается с учетом заданной доверительной вероятности P . $P = 0.90$, $t = 1,82$;

ε – продольная относительная погрешность эксперимента;

W – коэффициент вариации, $W = S/\bar{E}$.

Результаты вычислений приведены в таблицах 3.4 и 3.5.

Конечным этапом обработки результатов измерений являлось установление доверительного интервала:

$$E_{min} = \bar{E} - \frac{tS}{\sqrt{n}}; \quad (3.10)$$

$$E_{max} = \bar{E} + \frac{tS}{\sqrt{n}}, \quad (3.11)$$

или

$$\bar{E} - \frac{tS}{\sqrt{n}} \leq E \leq \bar{E} + \frac{tS}{\sqrt{n}} \quad (3.12)$$

В настоящих исследованиях предельная относительная погрешность эксперимента имела значение 5%, а доверительная вероятность $P = 0,90$.

Результаты вычислений приведены в таблицах 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5 – Результаты статистической обработки значений показателя освещенности E , lx, без ультразвукового воздействия

| Показатель | Время замера, с | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 | 600 |
| \bar{E} | 65,64 | 70,45 | 72,64 | 75,64 | 76,64 | 78,91 | 79,82 | 82,36 | 83,64 | 84,55 |
| D | 9,25 | 7,27 | 3,65 | 3,05 | 6,25 | 1,49 | 5,36 | 3,45 | 9,65 | 3,07 |
| S | 3,04 | 2,70 | 1,91 | 1,75 | 2,50 | 1,22 | 2,32 | 1,86 | 3,11 | 1,75 |
| A | 0,286 | 0,643 | 0,151 | 0,304 | 0,132 | 0,753 | 0,024 | 0,705 | 0,109 | 0,539 |
| K | 1,856 | 2,112 | 1,232 | 1,934 | 1,302 | 1,666 | 1,955 | 2,049 | 1,508 | 2,210 |
| W | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,02 |
| t | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 |
| ε | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| N | 2,8 | 1,9 | 0,9 | 0,7 | 1,4 | 0,3 | 1,1 | 0,7 | 1,8 | 0,6 |
| E_{min} | 64,0 | 69,0 | 71,6 | 74,7 | 75,3 | 78,2 | 78,5 | 81,3 | 81,9 | 83,6 |
| E_{max} | 67,3 | 71,9 | 73,7 | 76,6 | 78,0 | 79,6 | 81,1 | 83,4 | 85,3 | 85,5 |

Таблица 3.6 – Результаты статистической обработки значений показателя освещенности E , lx, с ультразвуковым воздействием

| Показатель | Время замера, с | | | | | | | | | |
|------------|-----------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 | 600 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| \bar{E} | 80,00 | 89,91 | 95,09 | 100,73 | 105,18 | 108,91 | 112,55 | 115,55 | 118,00 | 119,64 |
| D | 10,40 | 10,09 | 4,29 | 3,02 | 2,56 | 6,49 | 3,47 | 2,27 | 3,40 | 5,45 |
| S | 3,22 | 3,18 | 2,07 | 1,74 | 1,60 | 2,55 | 1,86 | 1,51 | 1,84 | 2,34 |
| A | 0,195 | 0,265 | 0,075 | 0,380 | 0,132 | 0,455 | 0,272 | 0,079 | 0,087 | 0,571 |

Продолжение таблицы 3.4

| | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| K | 1,981 | 2,024 | 2,129 | 2,060 | 1,682 | 1,616 | 2,003 | 1,689 | 1,659 | 1,851 |
| W | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| t | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 |
| ε | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| N | 2,15 | 1,65 | 0,63 | 0,39 | 0,31 | 0,73 | 0,36 | 0,23 | 0,32 | 0,50 |
| E_{\min} | 78,2 | 88,2 | 94,0 | 99,8 | 104,3 | 107,5 | 111,5 | 114,7 | 117,0 | 118,4 |
| E_{\max} | 81,8 | 91,7 | 96,2 | 101,7 | 106,1 | 110,3 | 113,6 | 116,4 | 119,0 | 120,9 |

По средним значениям освещенности построен график зависимости показателя освещенности E от времени осаждения (рисунок 3.7).

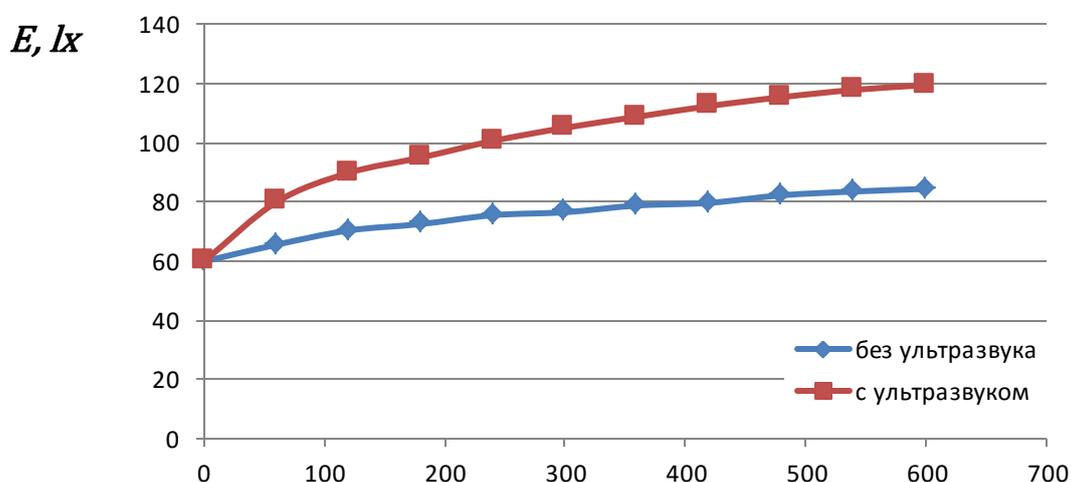


Рисунок 3.7 – Зависимость показателя освещенности от t, c и осаждения

Полученные экспериментальные данные позволяют использовать их для определения показателей изменения освещенности, степени прозрачности, степени поглощения, коэффициента коагуляции и сделать вывод об эффективности процессов ультразвуковой коагуляции.

3.4 Обработка экспериментальных данных

По полученным экспериментальным данным определим степень прозрачности α . Степень прозрачности α в i -ый промежуток времени определим отношением показателя освещенности E после закачки газа к показателю освещенности до закачки газа – 140 лк.

$$\alpha_i = \frac{E_i}{140}, \quad (3.13)$$

где $i = 0 \dots 10$.

Для определения коэффициента коагуляции используем формулу зависимости кинетики коагуляции, описываемой экспоненциальной зависимостью [23]:

$$n = n_0 \exp(-kt), \quad (3.14)$$

где n и n_0 – счетные концентрации частиц газа, соответственно текущие и в начальный момент; k – коэффициент коагуляции.

Допуская, что n и n_0 – счетные концентрации частиц газа, соответственно текущие и в начальный момент пропорциональны степени поглощения светового потока β коэффициент коагуляции определяется по формуле:

$$k_i = -\frac{\ln \frac{\beta_i}{\beta_{i-1}}}{t}, \quad (3.15)$$

где $i = 1 \dots 10$;

t – промежуток времени между снятиями показаний, с. $t = 60$ с.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7. – Результаты расчетов коэффициента коагуляции

| Секунды | Показатель освещенности - E, lx | | Изменение освещенности - ΔE, lx | | Степень прозрачности - α | | Степень поглощения светового потока - β | | Коэффициент коагуляции - k | |
|---------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|---|----------------|----------------------------|----------------|
| | без ультразвук а | с ультразвуком | без ультразвук а | с ультразвуком | без ультразвук а | с ультразвуком | без ультразвук а | с ультразвуком | без ультразвук а | с ультразвук а |
| 0 | 60,00 | 60,00 | | | 0,429 | 0,429 | 0,571 | 0,571 | | |
| 60 | 65,64 | 80,00 | 5,64 | 20,00 | 0,469 | 0,571 | 0,531 | 0,429 | 0,0012 | 0,0048 |
| 120 | 70,45 | 89,91 | 4,82 | 9,91 | 0,503 | 0,642 | 0,497 | 0,358 | 0,0011 | 0,0030 |
| 180 | 72,64 | 95,09 | 2,18 | 5,18 | 0,519 | 0,679 | 0,481 | 0,321 | 0,0005 | 0,0018 |
| 240 | 75,64 | 101,73 | 3,00 | 5,64 | 0,540 | 0,719 | 0,460 | 0,281 | 0,0008 | 0,0022 |
| 300 | 76,64 | 105,18 | 1,00 | 4,45 | 0,547 | 0,751 | 0,453 | 0,249 | 0,0003 | 0,0020 |
| 360 | 78,91 | 108,91 | 2,27 | 3,73 | 0,564 | 0,778 | 0,436 | 0,222 | 0,0006 | 0,0019 |
| 420 | 79,82 | 112,55 | 0,91 | 3,64 | 0,570 | 0,804 | 0,430 | 0,196 | 0,0002 | 0,0021 |
| 480 | 82,36 | 115,55 | 2,55 | 3,00 | 0,588 | 0,825 | 0,412 | 0,175 | 0,0007 | 0,0019 |
| 540 | 83,64 | 118,00 | 1,27 | 2,45 | 0,597 | 0,843 | 0,403 | 0,157 | 0,0004 | 0,0018 |
| 600 | 84,55 | 119,64 | 0,91 | 1,64 | 0,604 | 0,855 | 0,396 | 0,145 | 0,0003 | 0,0013 |

По результатам расчетов построены графики зависимостей показателей изменения освещенности (рисунок 3.8), степени прозрачности (рисунок 3.9), степени поглощения (рисунок 3.10), коэффициента коагуляции (рисунок 3.11) от времени осаждения.

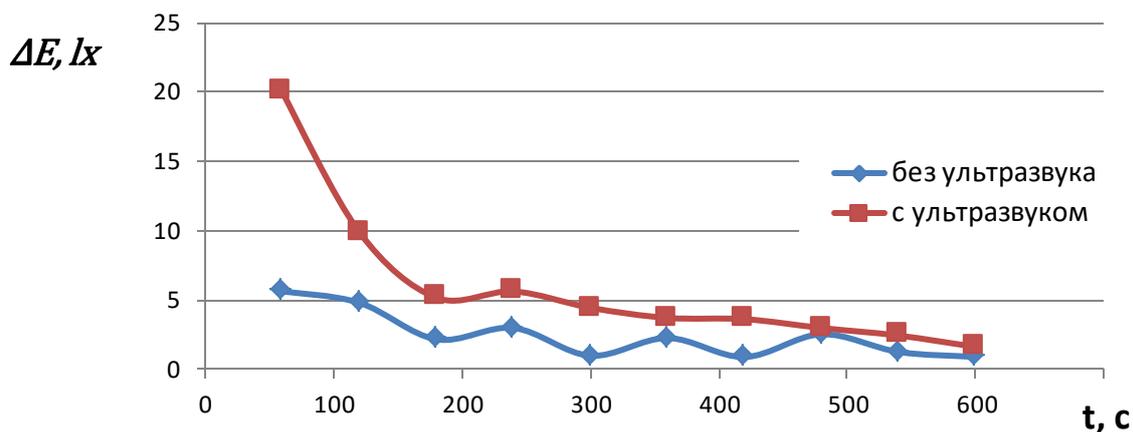


Рисунок 3.8 – Зависимость показателя изменения освещенности ΔE от времени осаждения t

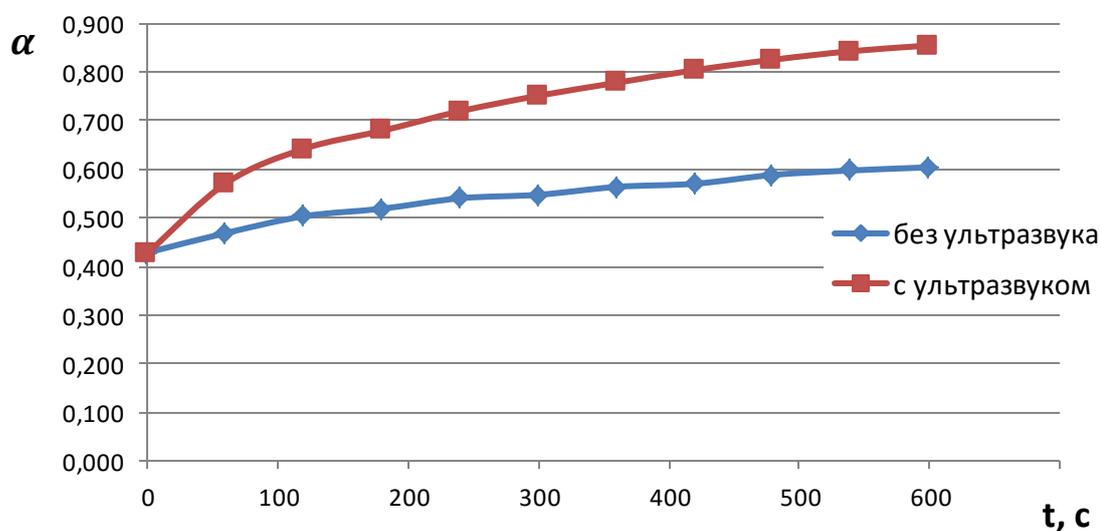


Рисунок 3.9 – Зависимость показателя степени прозрачности α от времени осаждения t

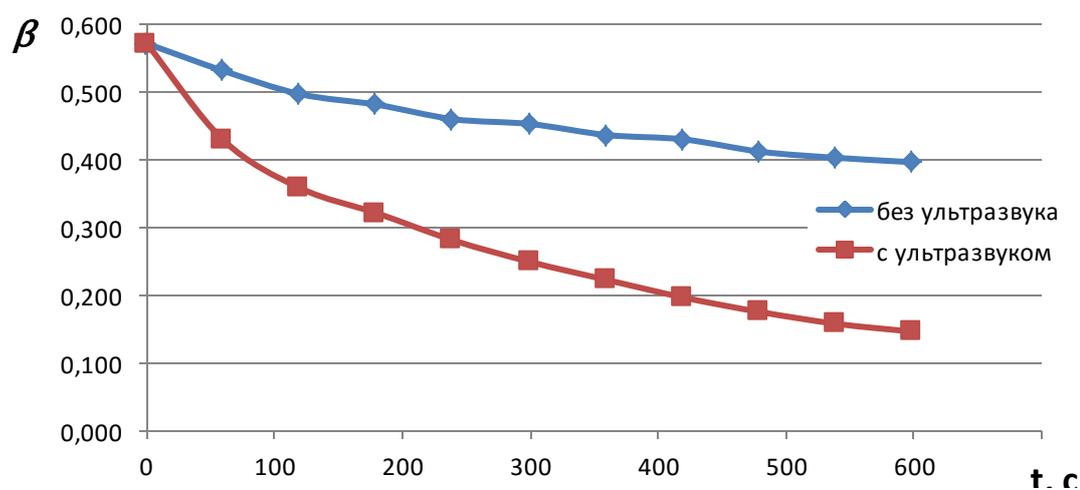


Рисунок 3.10 – Зависимость показателя степени поглощения β от времени осаждения t

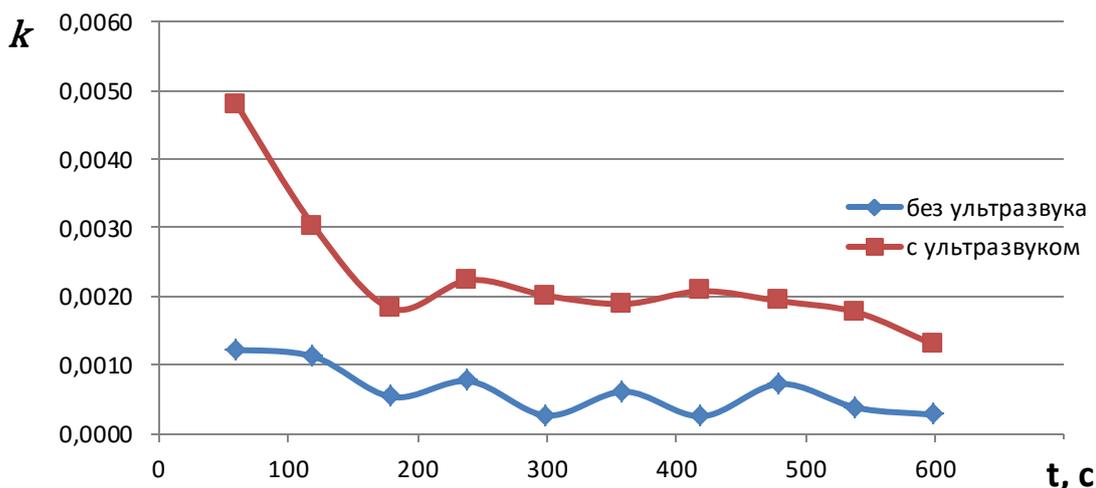


Рисунок 3.11 – Зависимость показателя коэффициента коагуляции k от времени осаждения t

Графические зависимости показателей изменения освещенности, степени прозрачности, поглощения, коэффициента коагуляции от времени осаждения наглядно показывают высокую эффективность ультразвуковой коагуляции частиц отработавшего газа.

3.5 Анализ полученных результатов

Проведём регрессионно-корреляционный анализ полученных значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t без использования и с использованием ультразвука по стандартной методике, изложенной в литературе [94, 95] и определим закономерность их изменений.

Линейная регрессия

Уравнение регрессии:

$$\hat{y} = ax + b \quad (3.16)$$

Коэффициент a определяется по формуле:

$$a = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \quad (3.17)$$

Коэффициент b определяется по формуле:

$$b = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \quad (3.18)$$

Коэффициент линейной парной корреляции:

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)(n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}} \quad (3.19)$$

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = r_{xy}^2 \quad (3.20)$$

Средняя ошибка аппроксимации определяется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% \quad (3.21)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты расчета функции линейной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t

| Показатели | Без ультразвука | С ультразвуком |
|--|-----------------|----------------|
| Коэффициент a | -0,0136364 | -0,0402020 |
| Коэффициент b | 10,6 | 36,0666667 |
| Коэффициент линейной парной корреляции | -0,7255863 | -0,7429615 |
| Коэффициент детерминации | 0,5264754 | 0,5519919 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 45,4635773 | 19,6705412 |

Уравнение линейной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t примет вид:

- без ультразвука:

$$k = (-0,0136364 \cdot t + 10,6) \cdot 10^{-4} \quad (3.22)$$

- с ультразвуком:

$$k = (-0,0402020 \cdot t + 36,0666667) \cdot 10^{-4} \quad (3.23)$$

Экспериментальные и эмпирические (линейная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Экспериментальные и эмпирические (линейная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

| t, с | Без ультразвука | | С ультразвуком | |
|------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| | Экспериментальные данные | Линейная регрессия | Экспериментальные данные | Линейная регрессия |
| 60 | 0,00121766 | 0,000978182 | 0,004794701 | 0,003365455 |
| 120 | 0,001116442 | 0,000896363 | 0,003008417 | 0,003124243 |
| 180 | 0,000531253 | 0,000814545 | 0,001819988 | 0,002883031 |
| 240 | 0,000759276 | 0,000732726 | 0,002235165 | 0,002641819 |
| 300 | 0,000260978 | 0,000650908 | 0,00200651 | 0,002400607 |
| 360 | 0,000608785 | 0,00056909 | 0,001887071 | 0,002159395 |
| 420 | 0,00024988 | 0,000487271 | 0,002073062 | 0,001918183 |
| 480 | 0,000720277 | 0,000405453 | 0,001928594 | 0,001676971 |
| 540 | 0,000372158 | 0,000323634 | 0,001762894 | 0,001435759 |
| 600 | 0,000271009 | 0,000241816 | 0,001288195 | 0,001194547 |

Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (линейная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены на рисунке 3.12

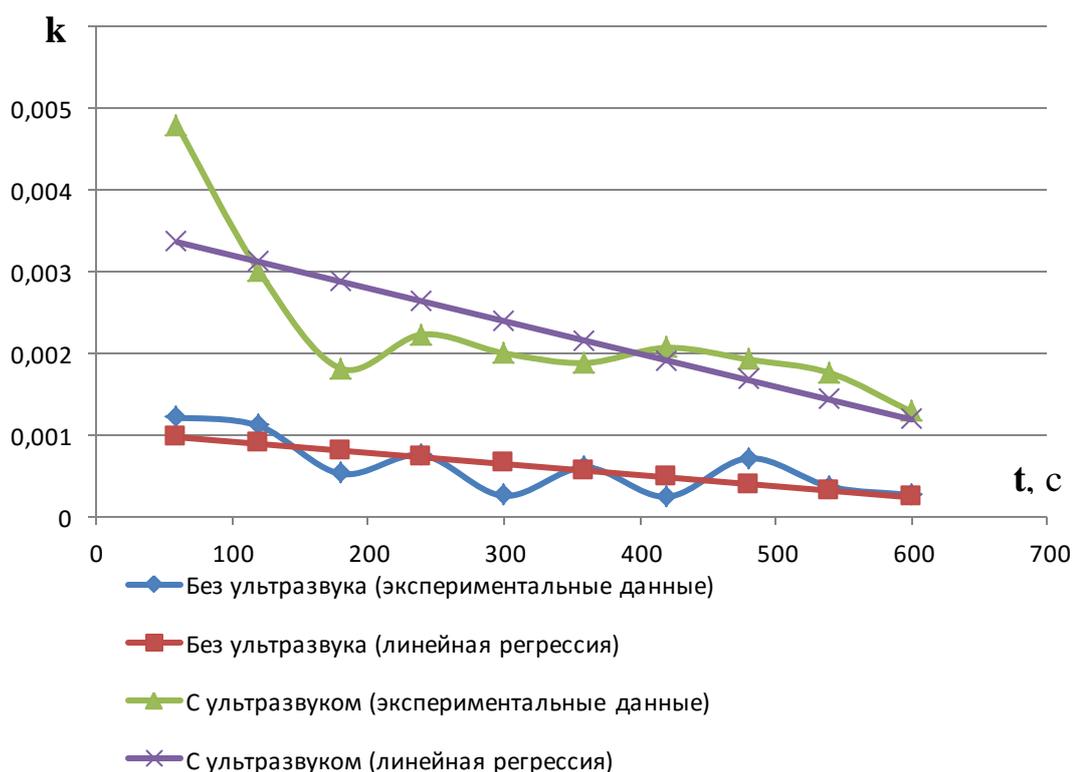


Рисунок 3.12 – Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (линейная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

Квадратичная регрессия

Уравнение регрессии:

$$\hat{y} = ax^2 + bx + c \quad (3.24)$$

Система уравнений для нахождения коэффициентов a , b и c :

$$\begin{cases} a \sum x_i^2 + b \sum x_i + nc = \sum y_i \\ a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \end{cases} \quad (3.25)$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.26)$$

где

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i \quad (3.27)$$

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.28)$$

Средняя ошибка аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% \quad (3.29)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 3.7

Таблица 3.7 – Результаты расчета функции квадратичной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t

| Показатели | Без ультразвука | С ультразвуком |
|-----------------|-----------------|----------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Коэффициент a | 0,0000442 | 0,0001473 |

Продолжение таблицы 3.7

| 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------|------------|------------|
| Коэффициент b | 0,0428030 | 0,1374242 |
| Коэффициент c | 14,10 | 47,73 |
| Коэффициент корреляции | 0,8086220 | 0,8501427 |
| Коэффициент детерминации | 0,6538695 | 0,7227426 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 38,3055195 | 18,8015330 |

Уравнение квадратичной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t примет вид:

- без ультразвука:

$$k = (0,0000442 t^2 - 0,0428030 t + 14,10) \cdot 10^{-4} \quad (3.30)$$

- с ультразвуком:

$$k = (0,0001473 t^2 - 0,1374242 t + 47,73) \cdot 10^{-4} \quad (3.31)$$

Экспериментальные и эмпирические (квадратичная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены в таблице 3.8

Таблица 3.8 – Экспериментальные и эмпирические (квадратичная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

| t, c | Без ультразвука | | С ультразвуком | |
|--------|--------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| | Экспериментальные данные | Квадратичная регрессия | Экспериментальные данные | Квадратичная регрессия |
| 60 | 0,00121766 | 0,001169094 | 0,004794701 | 0,004001483 |
| 120 | 0,001116442 | 0,000960012 | 0,003008417 | 0,003336022 |
| 180 | 0,000531253 | 0,000782754 | 0,001819988 | 0,002776616 |
| 240 | 0,000759276 | 0,00063732 | 0,002235165 | 0,002323267 |
| 300 | 0,000260978 | 0,00052371 | 0,00200651 | 0,001975974 |
| 360 | 0,000608785 | 0,000441924 | 0,001887071 | 0,001734737 |
| 420 | 0,00024988 | 0,000391962 | 0,002073062 | 0,001599556 |
| 480 | 0,000720277 | 0,000373824 | 0,001928594 | 0,00157043 |
| 540 | 0,000372158 | 0,00038751 | 0,001762894 | 0,001647361 |
| 600 | 0,000271009 | 0,00043302 | 0,001288195 | 0,001830348 |

Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (квадратичная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены на рисунке 3.13.

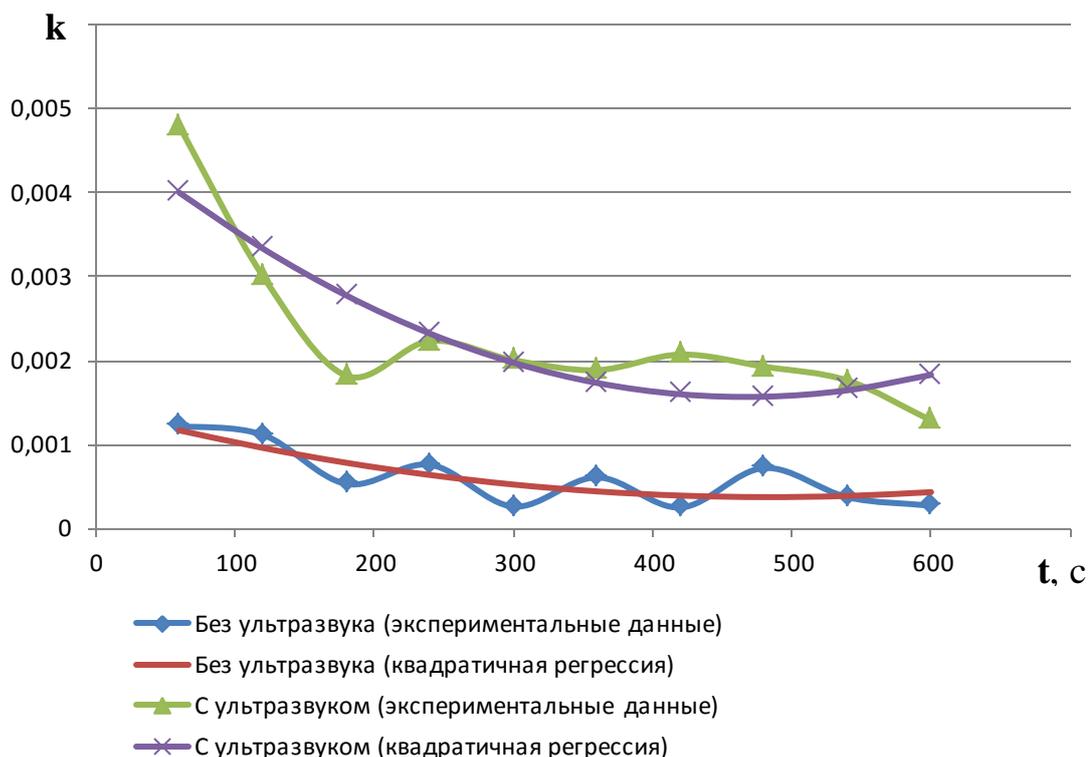


Рисунок 3.13 – Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (квадратичная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

Кубическая регрессия

Уравнение регрессии:

$$\hat{y} = ax^3 + bx^2 + cx + d \tag{3.32}$$

Система уравнений для нахождения коэффициентов a , b , c и d :

$$\begin{cases} a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd = \sum y_i, \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i = \sum x_i y_i, \\ a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i, \\ a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i. \end{cases} \tag{3.33}$$

Коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, средняя ошибка аппроксимации - используются те же формулы (3.26 - 3.29), что и для квадратичной регрессии.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.9

Таблица 3.9 – Результаты расчета функции кубической регрессии коэффициента коагуляции k от времени t

| Показатели | Без ультразвука | С ультразвуком |
|---------------------------------|-----------------|----------------|
| Коэффициент a | -0,0000002 | -0,0000012 |
| Коэффициент b | 0,0002223 | 0,0012994 |
| Коэффициент c | -0,0920778 | -0,4562322 |
| Коэффициент d | 17,43 | 69,30 |
| Коэффициент корреляции | 0,8356506 | 0,9732228 |
| Коэффициент детерминации | 0,6983119 | 0,9471627 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 36,1394885 | 8,2440902 |

Уравнение кубической регрессии коэффициента коагуляции k от времени t примет вид:

- без ультразвука:

$$k = (-0,0000002t^3 + 0,0002223t^2 - 0,0920778t + 17,43) \cdot 10^{-4} \quad (3.34)$$

- с ультразвуком:

$$k = (-0,0000012t^3 + 0,0012994t^2 - 0,4562322t + 69,30) \cdot 10^{-4} \quad (3.35)$$

Экспериментальные и эмпирические (кубическая регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Экспериментальные и эмпирические (кубическая регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

| t, c | Без ультразвука | | С ультразвуком | |
|--------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | Экспериментальные данные | Кубическая регрессия | Экспериментальные данные | Кубическая регрессия |
| 60 | 0,001217660 | 0,001266241 | 0,004794701 | 0,004634471 |
| 120 | 0,001116442 | 0,000923618 | 0,003008417 | 0,00311899 |
| 180 | 0,000531253 | 0,000689212 | 0,001819988 | 0,002228036 |
| 240 | 0,000759276 | 0,000537101 | 0,002235165 | 0,001806091 |
| 300 | 0,000260978 | 0,000441366 | 0,002006510 | 0,001697634 |
| 360 | 0,000608785 | 0,000376087 | 0,001887071 | 0,001747145 |
| 420 | 0,000249880 | 0,000315344 | 0,002073062 | 0,001799104 |
| 480 | 0,000720277 | 0,000233218 | 0,001928594 | 0,00169799 |
| 540 | 0,000372158 | 0,000103787 | 0,001762894 | 0,001288285 |
| 600 | 0,000271009 | -0,000098868 | 0,001288195 | 0,000414468 |

Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (кубическая регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены на рисунке 3.14.

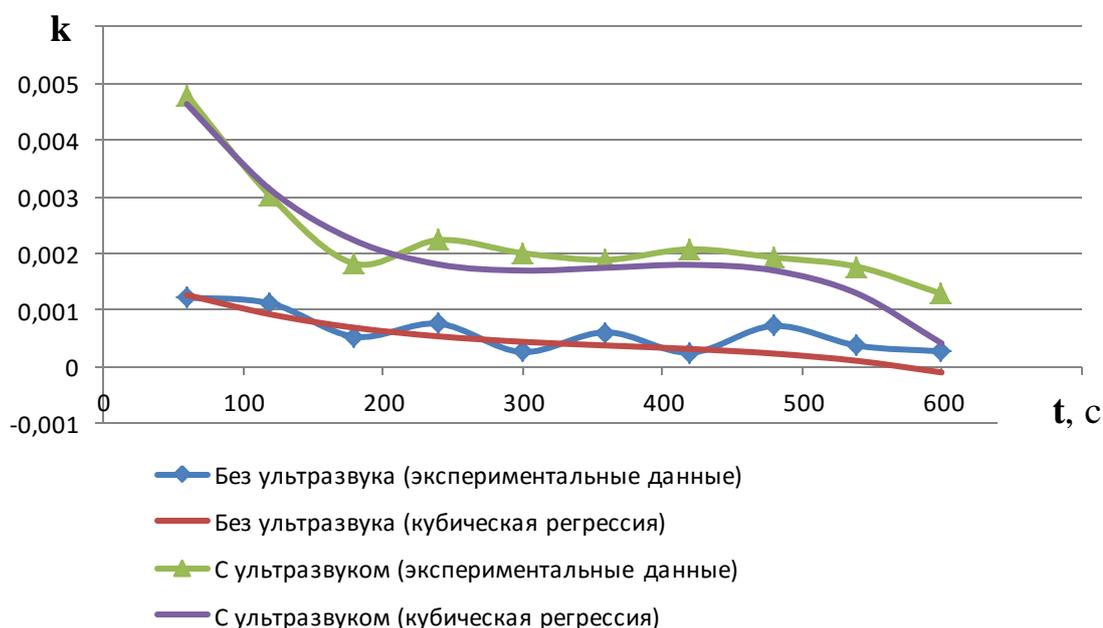


Рисунок 3.14 – Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (кубическая регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

Степенная регрессия

Уравнение регрессии:

$$\hat{y} = a \cdot x^b \quad (3.36)$$

Коэффициент a определяется по формуле:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} \sum \ln y_i - \frac{b}{n} \sum \ln x_i\right) \quad (3.37)$$

Коэффициент b определяется по формуле:

$$b = \frac{n \sum (\ln x_i \cdot \ln y_i) - \sum \ln x_i \cdot \sum \ln y_i}{n \sum \ln^2 x_i - (\sum \ln x_i)^2} \quad (3.38)$$

Коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, средняя ошибка аппроксимации - используются те же формулы (3.26 - 3.29), что и для квадратичной регрессии.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.11

Таблица 3.11 – Результаты расчета функции степенной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t

| Показатели | Без ультразвука | С ультразвуком |
|---------------------------------|-----------------|----------------|
| Коэффициент a | 133,2196139 | 232,5708630 |
| Коэффициент b | -0,5768993 | -0,4255949 |
| Коэффициент корреляции | 0,8073428 | 0,9193806 |
| Коэффициент детерминации | 0,6518023 | 0,8452607 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 35,4446902 | 11,8821493 |

Уравнение степенной регрессии коэффициента коагуляции от времени примет вид:

- без ультразвука:

$$k = (133,2196139 t^{-0,5768993}) \cdot 10^{-4} \quad (3.39)$$

- с ультразвуком:

$$k = (232,5708630 t^{-0,4255949}) \cdot 10^{-4} \quad (3.40)$$

Экспериментальные и эмпирические (степенная регрессия) значения коэффициента коагуляции в зависимости от времени приведены в таблице 3.12

Таблица 3.12 – Экспериментальные и эмпирические (степенная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

| t, c | Без ультразвука | | С ультразвуком | |
|--------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| | Экспериментальные данные | Степенная регрессия | Экспериментальные данные | Степенная регрессия |
| 60 | 0,001217660 | 0,001255319 | 0,004794701 | 0,00407177 |
| 120 | 0,001116442 | 0,000841569 | 0,003008417 | 0,003031561 |
| 180 | 0,000531253 | 0,000666044 | 0,001819988 | 0,002551073 |
| 240 | 0,000759276 | 0,000564191 | 0,002235165 | 0,002257093 |
| 300 | 0,000260978 | 0,000496042 | 0,002006510 | 0,002052604 |
| 360 | 0,000608785 | 0,000446518 | 0,001887071 | 0,001899354 |
| 420 | 0,000249880 | 0,000408524 | 0,002073062 | 0,001778745 |
| 480 | 0,000720277 | 0,000378235 | 0,001928594 | 0,001680478 |
| 540 | 0,000372158 | 0,000353388 | 0,001762894 | 0,001598315 |
| 600 | 0,000271009 | 0,000332548 | 0,001288195 | 0,001528229 |

Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (степенная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены на рисунке 3.15

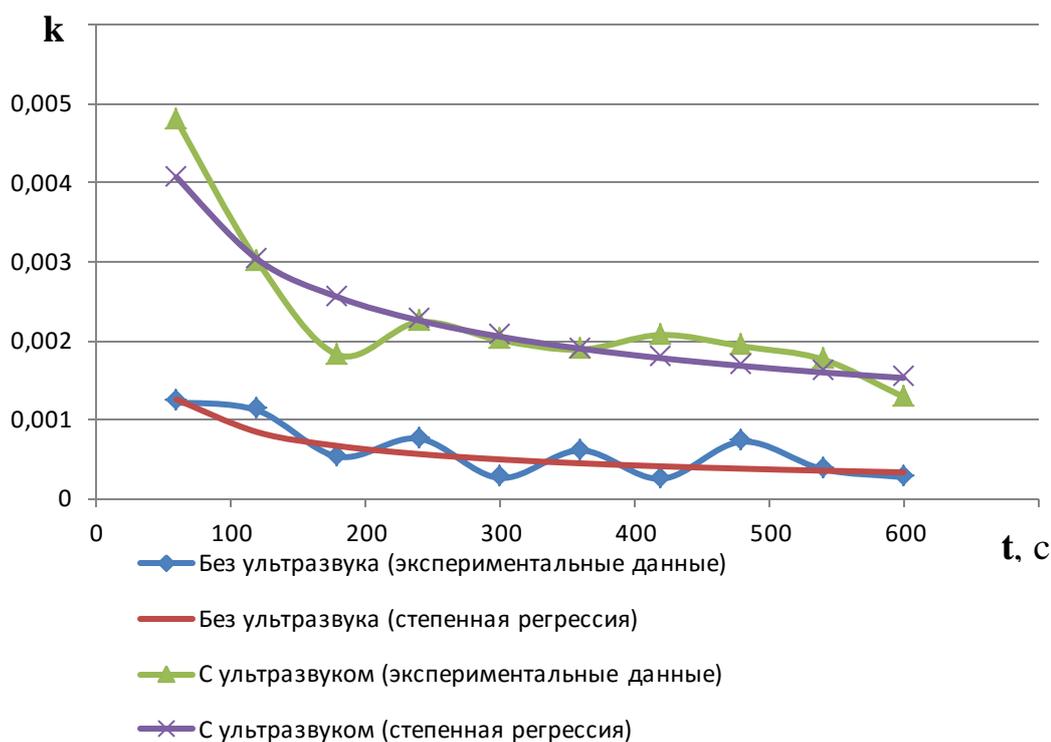


Рисунок 3.15 – Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (степенная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

Показательная регрессия

Уравнение регрессии:

$$\hat{y} = a \cdot b^x \tag{3.41}$$

Коэффициент a определяется по формуле:

$$a = \exp\left(\frac{1}{n} \sum \ln y_i - \frac{\ln b}{n} \sum x_i\right) \tag{3.42}$$

Коэффициент b определяется по формуле:

$$b = \exp \frac{n \sum x_i \ln y_i - \sum x_i \cdot \sum \ln y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{3.43}$$

Коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, средняя ошибка аппроксимации - используются те же формулы (3.26 - 3.29), что и для квадратичной регрессии.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.13

Таблица 3.13 – Результаты расчета функции показательной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t

| Показатели | Без ультразвука | С ультразвуком |
|---------------------------------|-----------------|----------------|
| Коэффициент a | 10,6971362 | 35,5964301 |
| Коэффициент b | 0,9978466 | 0,9984605 |
| Коэффициент корреляции | 0,7491687 | 0,7698100 |
| Коэффициент детерминации | 0,5612538 | 0,5926074 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 39,7408550 | 15,9516601 |

Уравнение показательной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t примет вид:

- без ультразвука:

$$k = 10,6971362 \cdot 0,9978466^t \cdot 10^{-4} \quad (3.44)$$

- с ультразвуком:

$$k = 35,5964301 \cdot 0,9984605^t \cdot 10^{-4} \quad (3.45)$$

Экспериментальные и эмпирические (показательная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены в таблице 3.14

Таблица 3.14 – Экспериментальные и эмпирические (показательная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

| t, с | Без ультразвука | | С ультразвуком | |
|------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | Экспериментальные данные | Показательная регрессия | Экспериментальные данные | Показательная регрессия |
| 60 | 0,001217660 | 0,000939928 | 0,004794701 | 0,003245337 |
| 120 | 0,001116442 | 0,000825888 | 0,003008417 | 0,002958783 |
| 180 | 0,000531253 | 0,000725685 | 0,001819988 | 0,002697531 |
| 240 | 0,000759276 | 0,000637639 | 0,002235165 | 0,002459346 |
| 300 | 0,000260978 | 0,000560276 | 0,002006510 | 0,002242193 |
| 360 | 0,000608785 | 0,000492299 | 0,001887071 | 0,002044214 |
| 420 | 0,000249880 | 0,000432570 | 0,002073062 | 0,001863715 |
| 480 | 0,000720277 | 0,000380087 | 0,001928594 | 0,001699155 |
| 540 | 0,000372158 | 0,000333972 | 0,001762894 | 0,001549124 |
| 600 | 0,000271009 | 0,000293452 | 0,001288195 | 0,001412341 |

Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (показательная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены на рисунке 3.16

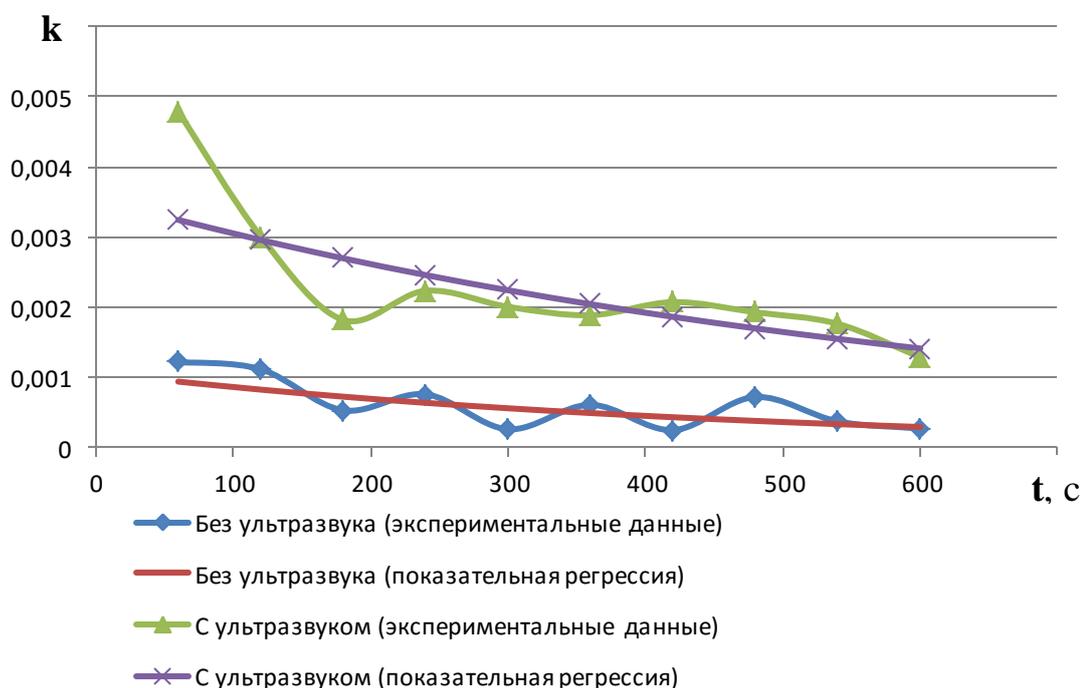


Рисунок 3.16 – Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (показательная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

Логарифмическая регрессия

Уравнение регрессии:

$$\hat{y} = a + b \ln x \quad (3.46)$$

Коэффициент a определяется по формуле:

$$a = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{b}{n} \sum \ln x_i \quad (3.47)$$

Коэффициент b определяется по формуле:

$$b = \frac{n \sum (y_i \ln x_i) - \sum \ln x_i \cdot \sum y_i}{n \sum \ln^2 x_i - (\sum \ln x_i)^2} \quad (3.48)$$

Коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, средняя ошибка аппроксимации - используются те же формулы (3.26 - 3.29), что и для квадратичной регрессии.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.15

Таблица 3.15 – Результаты расчета функции логарифмической регрессии коэффициента коагуляции k от времени t

| Показатели | Без ультразвука | С ультразвуком |
|---------------------------------|-----------------|----------------|
| Коэффициент a | 27,8815899 | 89,6447697 |
| Коэффициент b | -3,8848717 | -11,9255533 |
| Коэффициент корреляции | 0,8185216 | 0,8883753 |
| Коэффициент детерминации | 0,6699777 | 0,7892106 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 35,5724821 | 14,7625113 |

Уравнение логарифмической регрессии коэффициента коагуляции k от времени t примет вид:

- без ультразвука:

$$k = (27,8815899 - 3,8848717 \cdot \ln t) \cdot 10^{-4} \quad (3.49)$$

- с ультразвуком:

$$k = (89,6447697 - 11,9255533 \cdot \ln t) \cdot 10^{-4} \quad (3.50)$$

Экспериментальные и эмпирические (логарифмическая регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены в таблице 3.16

Таблица 3.16 – Экспериментальные и эмпирические (логарифмическая регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

| t, c | Без ультразвука | | С ультразвуком | |
|--------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | Экспериментальные данные | Логарифмическая регрессия | Экспериментальные данные | Логарифмическая регрессия |
| 60 | 0,001217660 | 0,001197559 | 0,004794701 | 0,004081745 |
| 120 | 0,001116442 | 0,000928280 | 0,003008417 | 0,003255128 |
| 180 | 0,000531253 | 0,000770762 | 0,001819988 | 0,002771589 |
| 240 | 0,000759276 | 0,000659001 | 0,002235165 | 0,002428512 |
| 300 | 0,000260978 | 0,000572313 | 0,002006510 | 0,002162401 |
| 360 | 0,000608785 | 0,000501483 | 0,001887071 | 0,001944972 |
| 420 | 0,000249880 | 0,000441598 | 0,002073062 | 0,001761139 |
| 480 | 0,000720277 | 0,000389722 | 0,001928594 | 0,001601895 |
| 540 | 0,000372158 | 0,000343965 | 0,001762894 | 0,001461433 |
| 600 | 0,000271009 | 0,000303034 | 0,001288195 | 0,001335784 |

Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (логарифмическая регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены на рисунке 3.17

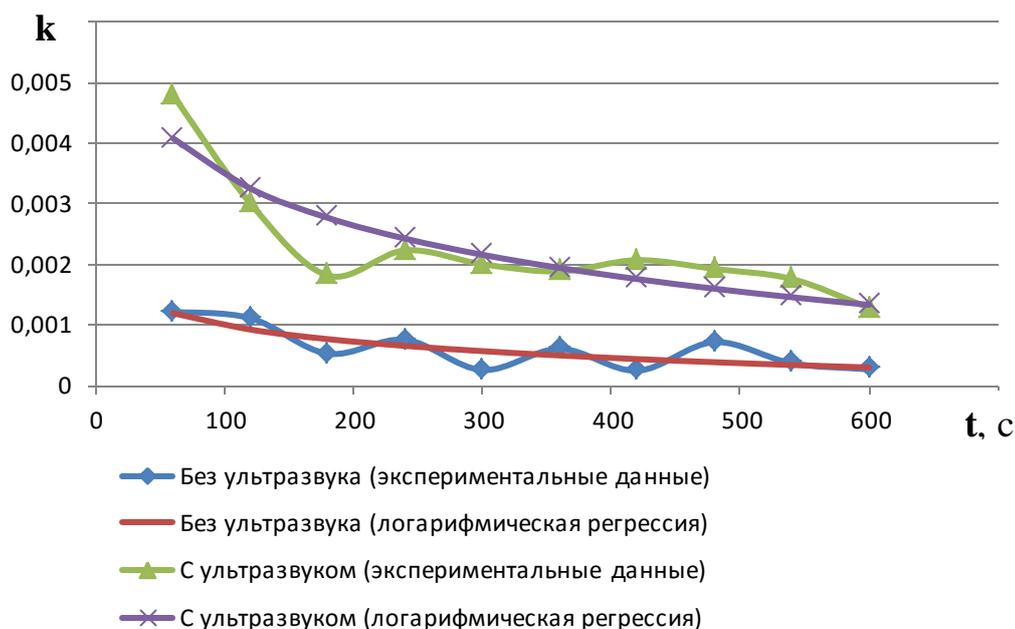


Рисунок 3.16 – Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (логарифмическая регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

Гиперболическая регрессия

Уравнение регрессии:

$$\hat{y} = a + \frac{b}{x} \quad (3.51)$$

Коэффициент a определяется по формуле:

$$a = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{b}{n} \sum \frac{1}{x_i} \quad (3.52)$$

Коэффициент b определяется по формуле:

$$b = \frac{n \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} \sum y_i}{n \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} \quad (3.53)$$

Коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, средняя ошибка аппроксимации - используются те же формулы (3.26 - 3.29), что и для квадратичной регрессии.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Результаты расчета функции гиперболической регрессии коэффициента коагуляции k от времени t

| Показатели | Без ультразвука | С ультразвуком |
|---------------------------------|-----------------|----------------|
| Коэффициент a | 3,2191661 | 12,8257622 |
| Коэффициент b | 590,1396602 | 2043,2255254 |
| Коэффициент корреляции | 0,7987887 | 0,9605531 |
| Коэффициент детерминации | 0,6380633 | 0,9226623 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 40,1251236 | 10,3018760 |

Уравнение гиперболической регрессии коэффициента коагуляции k от времени t примет вид:

- без ультразвука:

$$k = 3,2191661 + \frac{590,1396602}{t} \cdot 10^{-4} \quad (3.54)$$

- с ультразвуком:

$$k = 12,8257622 + \frac{2043,2255254}{t} \cdot 10^{-4} \quad (3.55)$$

Экспериментальные и эмпирические (гиперболическая регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Экспериментальные и эмпирические (гиперболическая регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

| t, c | Без ультразвука | | С ультразвуком | |
|--------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | Экспериментальные данные | Гиперболическая регрессия | Экспериментальные данные | Гиперболическая регрессия |
| 60 | 0,001217660 | 0,001305483 | 0,004794701 | 0,004687952 |
| 120 | 0,001116442 | 0,000813700 | 0,003008417 | 0,002985264 |
| 180 | 0,000531253 | 0,000649772 | 0,001819988 | 0,002417702 |
| 240 | 0,000759276 | 0,000567808 | 0,002235165 | 0,002133920 |
| 300 | 0,000260978 | 0,000518630 | 0,002006510 | 0,001963651 |
| 360 | 0,000608785 | 0,000485844 | 0,001887071 | 0,001850139 |
| 420 | 0,000249880 | 0,000462426 | 0,002073062 | 0,001769058 |
| 480 | 0,000720277 | 0,000444862 | 0,001928594 | 0,001708248 |
| 540 | 0,000372158 | 0,000431202 | 0,001762894 | 0,001660951 |
| 600 | 0,000271009 | 0,000420273 | 0,001288195 | 0,001623114 |

Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (гиперболическая регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены на рисунке 3.17.

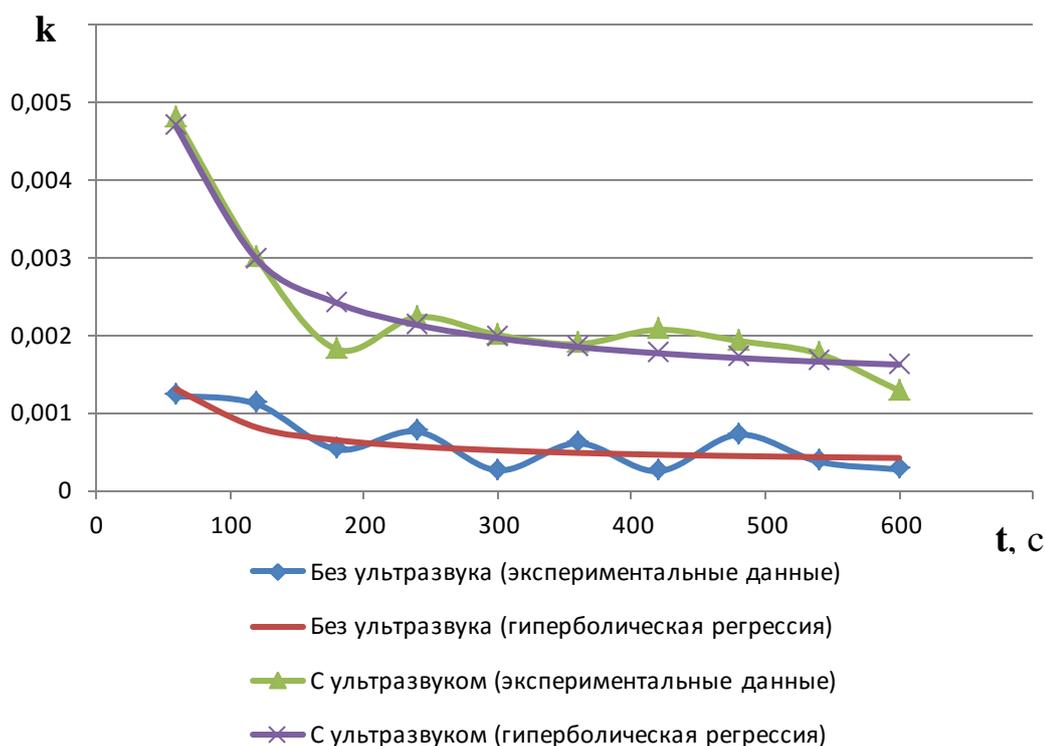


Рисунок 3.17 – Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (гиперболическая регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

Экспоненциальная регрессия

Уравнение регрессии:

$$\hat{y} = e^{a+bx} \tag{3.56}$$

Коэффициент a определяется по формуле:

$$a = \frac{1}{n} \sum \ln y_i - \frac{b}{n} \sum x_i \tag{3.57}$$

Коэффициент b определяется по формуле:

$$b = \frac{n \sum (x_i \ln y_i) - \sum x_i \cdot \sum \ln y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{3.58}$$

Коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, средняя ошибка аппроксимации - используются те же формулы (3.26 - 3.29), что и для квадратичной регрессии.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.19

Таблица 3.19 – Результаты расчета функции экспоненциальной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t

| Показатели | Без ультразвука | С ультразвуком |
|---------------------------------|-----------------|----------------|
| Коэффициент a | 2,3699761 | 3,5722454 |
| Коэффициент b | 0,0021557 | 0,0015407 |
| Коэффициент корреляции | 0,7491687 | 0,7698100 |
| Коэффициент детерминации | 0,5612538 | 0,5926074 |
| Средняя ошибка аппроксимации, % | 39,7408550 | 15,9516601 |

Уравнение экспоненциальной регрессии коэффициента коагуляции k от времени t примет вид:

- без ультразвука:

$$k = e^{2,3699761 - 0,0021557t} \cdot 10^{-4} \quad (3.59)$$

- с ультразвуком:

$$k = e^{3,5722454 - 0,0015407t} \cdot 10^{-4} \quad (3.60)$$

Экспериментальные и эмпирические (экспоненциальная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены в таблице 3.20

Таблица 3.20 – Экспериментальные и эмпирические (экспоненциальная регрессия) значения коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

| t, c | Без ультразвука | | С ультразвуком | |
|--------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | Экспериментальные данные | Экспоненциальная регрессия | Экспериментальные данные | Экспоненциальная регрессия |
| 60 | 0,001217660 | 0,000939929 | 0,004794701 | 0,003245334 |
| 120 | 0,001116442 | 0,000825891 | 0,003008417 | 0,002958778 |
| 180 | 0,000531253 | 0,000725688 | 0,001819988 | 0,002697524 |
| 240 | 0,000759276 | 0,000637643 | 0,002235165 | 0,002459338 |
| 300 | 0,000260978 | 0,000560280 | 0,002006510 | 0,002242184 |
| 360 | 0,000608785 | 0,000492303 | 0,001887071 | 0,002044204 |
| 420 | 0,000249880 | 0,000432574 | 0,002073062 | 0,001863705 |
| 480 | 0,000720277 | 0,000380091 | 0,001928594 | 0,001699144 |
| 540 | 0,000372158 | 0,000333976 | 0,001762894 | 0,001549113 |
| 600 | 0,000271009 | 0,000293456 | 0,001288195 | 0,001412329 |

Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (экспоненциальная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t приведены на рисунке 3.18

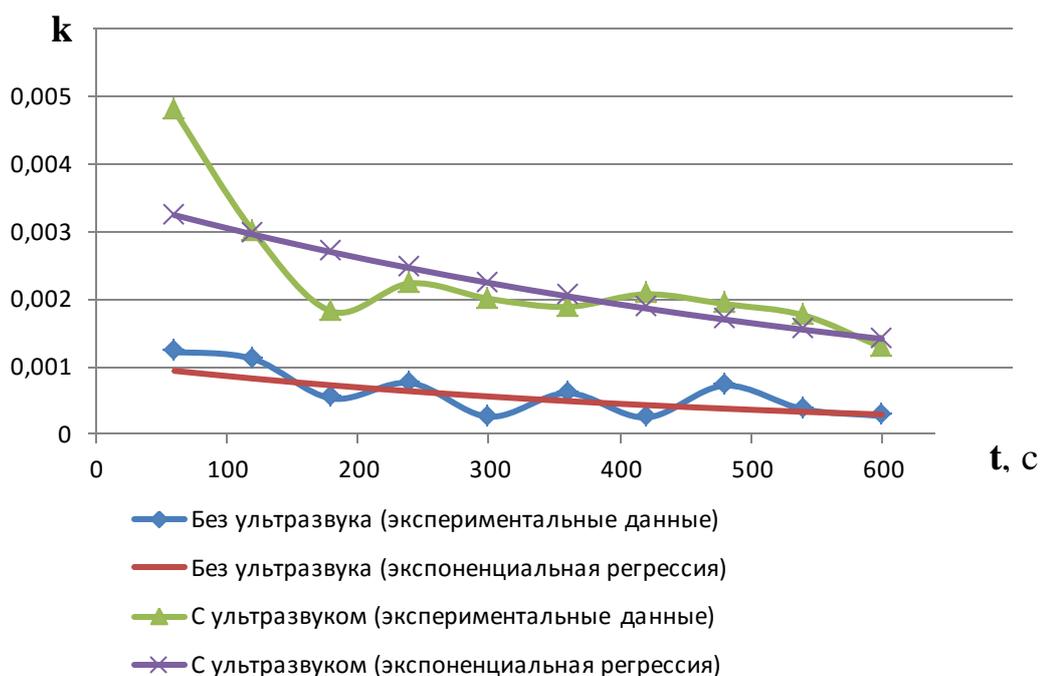


Рисунок 3.18 – Графики зависимостей экспериментальных и эмпирических (экспоненциальная регрессия) значений коэффициента коагуляции k в зависимости от времени t

Из анализа таблиц по наибольшим значениям коэффициентов корреляции, детерминации и наименьшим значениям средней ошибки аппроксимации для процесса коагуляции без использования ультразвука предлагается использовать уравнение кубической регрессии (3.34):

$$k = (-0,0000002t^3 + 0,0002223t^2 - 0,0920778t + 17,43) \cdot 10^{-4}$$

Для процесса коагуляции с использованием ультразвука также предлагается использовать уравнение кубической регрессии 3.35:

$$k = (-0,0000012t^3 + 0,0012994t^2 - 0,4562322t + 69,3) \cdot 10^{-4}$$

Таким образом, коэффициент коагуляции для процесса седиментации с использованием ультразвука необходимо определять по зависимости 3.35, а массу сажи по формуле 2.21.

Существенен процесс скорости коагуляции. Так как зависимости 3.34 и 3.35 имеют значительный коэффициент детерминации, возможно дифференцирование функции. Тогда скорость коагуляции будет подчиняться следующей зависимости [4, 90]:

- без ультразвука:

$$k' = (-0,0000006t^2 + 0,0004446t - 0,0920778) \cdot 10^{-4} \quad (3.61)$$

- с ультразвуком:

$$k' = (-0,0000036t^2 + 0,0025988t - 0,4562322) \cdot 10^{-4} \quad (3.62)$$

На рисунке 8 приведены графики зависимости функций (3.61) и (3.62)

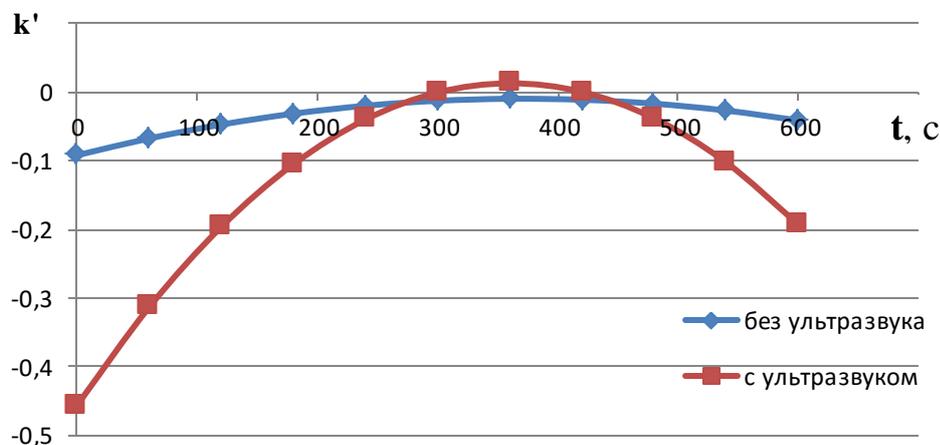


Рисунок 3.19 – Зависимость скорости коагуляции k' от времени t

В результате ультразвуковой интенсификации коагуляционных процессов степень прозрачности эксперимента с воздействием ультразвука (эксперимент 2) превысило значение степени прозрачности эксперимента без ультразвукового воздействия (эксперимент 1) в 1,23 раза. Через 10 минут проведения экспериментов, показатели освещенности при эксперименте 1 и эксперименте 2 были 85 lx и 120 lx соответственно.

Скорости изменения степени прозрачности и взаимосвязанной с ним степени поглощения, показатели изменения освещенности, коэффициента коагуляции в начальный момент времени с ультразвуковым воздействием более чем в 3 раза превосходят показатели без ультразвукового воздействия.

Анализируя графики изменения освещенности, коэффициента коагуляции и скорости ее изменения, можно сделать вывод о том, что процесс коагуляции твердых частиц наиболее эффективно проходит в интервале времени от начала коагуляции до 4 минут.

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о высокой эффективности применения ультразвука для очистки выхлопных газов ДВС путём ускорения процесса коагуляции и седиментации содержащихся в них твердых частиц, преимущественно сажи, с последующей её утилизацией.

3.6. Сравнение полученных опытных данных с теоретическими.

Произведем сравнение полученных экспериментальных данных освещенности с теоретическими. Выведем формулу теоретической зависимости освещенности E от времени t . Для этого, выражая зависимость

коэффициента коагуляции k_i через освещенность E и используя формулы (2.22), (2.23), (2.24), получили следующее соотношение:

$$k_i = -\frac{\ln \frac{1 - \frac{E_i}{E_{исх}}}{1 - \frac{E_{i-1}}{E_{исх}}}}{t}, \quad (3.63)$$

Откуда:

$$-k_i t = \ln \frac{1 - \frac{E_i}{E_{исх}}}{1 - \frac{E_{i-1}}{E_{исх}}}, \quad (3.64)$$

Потенцируя (3.64) получили:

$$e^{-k_i t} = \frac{1 - \frac{E_i}{E_{исх}}}{1 - \frac{E_{i-1}}{E_{исх}}}, \quad (3.65)$$

Откуда определили следующую теоретическую зависимость освещенности E от времени:

$$E_i = E_{исх} - (E_{исх} - E_{i-1}) \cdot e^{-k_i t}, \quad (3.66)$$

Коэффициенты коагуляции k без использования ультразвука и с использованием ультразвука определяются по формулам (3.34) и (3.35) соответственно.

$$k = (-0,0000002t^3 + 0,0002223t^2 - 0,0920778t + 17,4) \cdot 10^{-4}$$

$$k = (-0,0000012t^3 + 0,0012994t^2 - 0,4562322t + 69,3) \cdot 10^{-4}$$

Подставляя в формулу (3.66) соответствующие значения освещенности без закачки газа $E_{исх} = 140 \text{ lx}$, коэффициента коагуляции k_i , освещенность в предыдущей контрольной точке времени, учитывая, что $E_0 = 60 \text{ lx}$ получили значения освещенности $E_{теор.}$ для всех экспериментальных контрольных точек и сравнили с ними значения $E_{эксп.}$, полученные в процессе проведения эксперимента.

Погрешность эксперимента определили по средним значениям освещенности.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.21

Таблица 3.21 – Результаты расчета теоретической зависимости освещенности E от времени t и погрешности экспериментов.

| t, с | Без ультразвука | | | С ультразвуком | | |
|-------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| | k | $E_{\text{теор.}}$ | $E_{\text{эксп.}}$ | k | $E_{\text{теор.}}$ | $E_{\text{эксп.}}$ |
| 0 | | 60 | 60,00 | | 60,00 | 60,00 |
| 60 | 0,001266 | 65,85 | 65,64 | 0,0046345 | 79,42 | 80,00 |
| 120 | 0,000924 | 73,63 | 70,45 | 0,0031190 | 98,33 | 89,91 |
| 180 | 0,000689 | 81,38 | 72,64 | 0,0022280 | 112,10 | 95,09 |
| 240 | 0,000537 | 88,47 | 75,64 | 0,0018061 | 121,91 | 101,73 |
| 300 | 0,000441 | 94,86 | 76,64 | 0,0016976 | 129,13 | 105,18 |
| 360 | 0,000376 | 100,57 | 78,91 | 0,0017471 | 134,21 | 108,91 |
| 420 | 0,000315 | 105,46 | 79,82 | 0,0017991 | 137,28 | 112,55 |
| 480 | 0,000233 | 109,12 | 82,36 | 0,0016980 | 138,80 | 115,55 |
| 540 | 0,000104 | 110,80 | 83,64 | 0,0012883 | 139,40 | 118,00 |
| 600 | -9,9E-05 | 109,02 | 84,55 | 0,0004145 | 139,53 | 119,64 |
| Еср. | | 90,83 | 75,48 | | 117,28 | 100,60 |
| Погрешность | | 16,90% | | | 14,23% | |

Теоретические и экспериментальные зависимости освещенности E от времени t без воздействия ультразвука и с воздействием ультразвука представлены на рисунке 3.20.

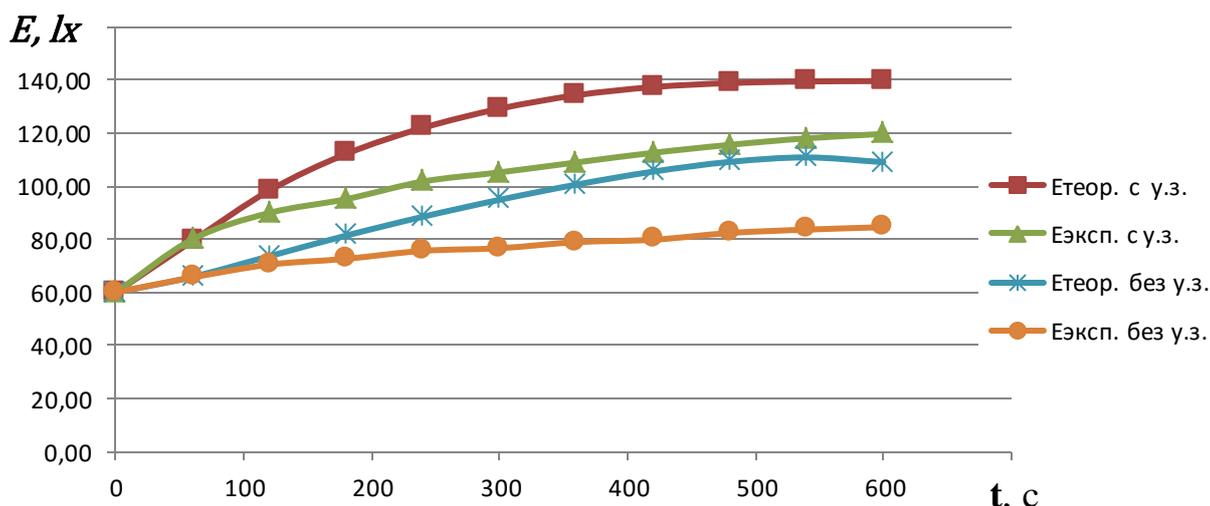


Рисунок 3.20 – Теоретические и экспериментальные зависимости освещенности E от времени t без воздействия ультразвука и с воздействием ультразвука

Характер изменения зависимостей освещенности E теоретических и экспериментальных от времени t без воздействия ультразвука и с воздействием ультразвука (рисунок 3.20), показали достаточную сходимость полученных экспериментальных данных с теоретическими. При этом погрешность средних значений экспериментальных данных в сравнении с теоретическими составила 16,9% без воздействия ультразвука и 14,23% с ультразвуком.

4. Реализация результатов исследования

4.1. Варианты конструкций систем утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания.

Явление интенсификации процессов коагуляции твердых частиц выхлопных газов под воздействием ультразвука предлагается использовать в системах очистки различных вариантов конструкции.

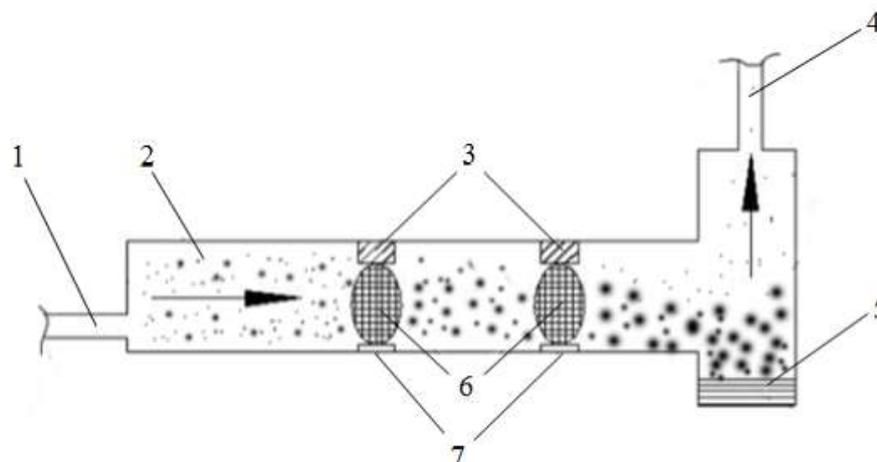
Нами разработаны конструкции устройств ультразвуковой очистки проточного, накопительного и комбинированного типа. В проточных устройствах выхлопной газ проходит через устройство, очищается и, не задерживаясь там, выводится в атмосферу. В накопительных устройствах выхлопной газ накапливается в ёмкости, где подвергается ультразвуковой очистке в течение определенного промежутка времени и затем выводится в атмосферу.

Варианты устройств отличаются схемой расположения ультразвукового оборудования, включающего в себя ультразвуковой генератор, излучатель и отражатели ультразвуковых волн, формой, ёмкостью и др. В устройствах проточного типа возможны следующие варианты установки ультразвукового оборудования: с поперечным воздействием ультразвука относительно движения газового потока; с продольным воздействием ультразвука, причем как по ходу, так и против хода движения газового потока; с множественным воздействием ультразвукового излучения под различными углами; динамической системой ультразвукового воздействия.

Одним из них является система ультразвуковой очистки проточного типа, встраиваемого в глушитель, при котором выхлопной газ, проходя через выхлопную систему, подвергается ультразвуковому воздействию. Схема работы ультразвукового оборудования глушителя с поперечным воздействием ультразвука приведена на рисунке 4.1 [96, 97]. В данном устройстве ультразвуковое воздействие происходит поперечно относительно движения газового потока. Укрупненные в результате коагуляционных процессов твердые частицы оседают на дно, которые затем утилизируются.

Отработавший газ подается в корпус глушителя 2 через входной патрубок 1 под давлением, зависящем от количества оборотов и нагрузки двигателя. Внутри глушителя располагаются излучатели 3 и отражатели 7 ультразвуковых волн. В образовавшихся зонах стоячих волн 6 интенсивно происходит коагуляция частиц выхлопного газа. Частицы газа, в том числе и увеличенные в размерах, смещаются в сторону выходного патрубка 4. При изменении направления движения газового потока, укрупненные и соответственно более тяжёлые частицы осаживаются в нижней части глушителя, с наибольшей вероятностью в месте для сбора и извлечения сажи 5. Не успевшие осесть, но уже укрупненные в размерах

частицы, улавливаются каким-либо фильтром, устанавливаемым после ультразвукового устройства.



1 – впускной патрубок; 2 – корпус глушителя; 3 – излучатель ультразвуковых волн; 4 – выпускной патрубок; 5 – место сбора и извлечения сажевых частиц; 6 – зона стоячих волн; 7 – отражатель ультразвуковых волн;
Рисунок 4.1 - Схема работы ультразвукового оборудования глушителя

Также предлагается реализация продольного воздействия ультразвука в глушителе. На рисунке 4.2 приведены схемы ультразвукового оборудования глушителя с продольным воздействием ультразвука по ходу движения газового потока (а) и против хода движения газового потока (б).

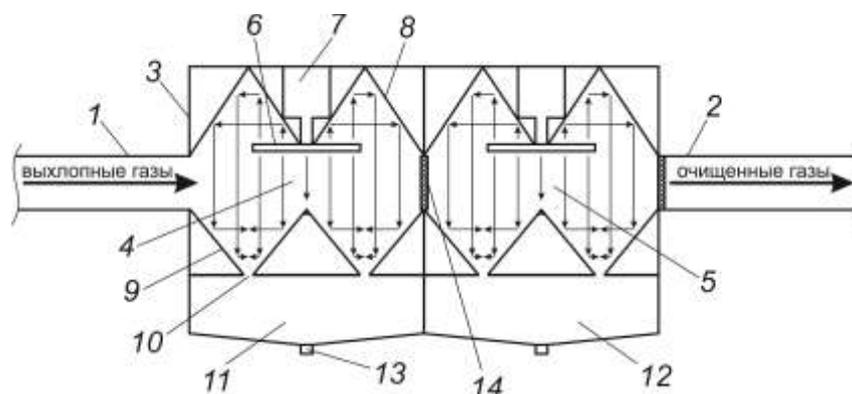


1 – впускной патрубок; 2 – корпус глушителя; 3 – выпускной патрубок; 4 – отражатель ультразвуковых волн; 5 – место сбора и извлечения сажевых частиц; 6 – зона стоячих волн; 7 – излучатель ультразвуковых волн

Рисунок 4.2 - Схемы работы ультразвукового оборудования глушителя с продольным воздействием ультразвука: а) по ходу движения газового потока; б) против хода движения газового потока

На рисунке 4.3 изображено разработанное и запатентованное нами устройство для ультразвуковой очистки выхлопных газов [98, 97] в котором происходит множественное воздействие ультразвука под различными углами.

Устройство для ультразвуковой очистки выхлопных газов содержит следующее оборудование: впускной патрубков 1, выпускной патрубков 2, корпус 3, первая коагуляционная камера 4, вторая коагуляционная камера 5, излучатели ультразвуковых колебаний 6, ультразвуковые преобразователи 7, верхние отражатели 8, нижние отражатели 9, отверстия 10, первая накопительная емкость 11, вторая накопительная емкость 12, отверстия с пробкой 13, фильтрационные сетки 14.



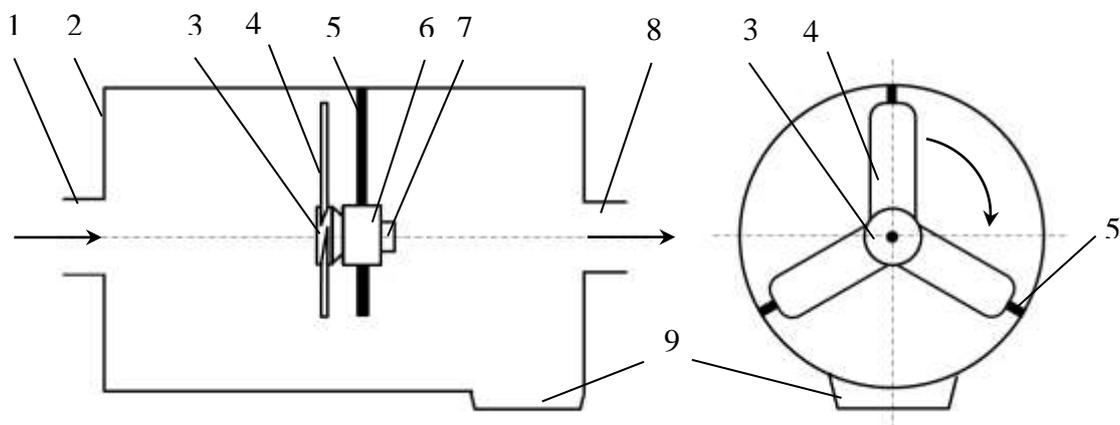
1 – впускной патрубков; 2 – выпускной патрубков; 3 – корпус;
 4 – коагуляционная камера; 5 – коагуляционная камера; 6 – излучатель
 ультразвуковых колебаний; 7 – преобразователь ультразвуковых колебаний;
 8 – верхние отражатели; 9 – нижние отражатели; 10 – отверстия для удаления
 частиц; 11, 12 – накопительные ёмкости для сбора частиц; 13 – отверстия с
 пробкой; 14 – фильтрационные сетки

Рисунок 4.3 - Устройство для ультразвуковой очистки выхлопных газов

Работа устройства для ультразвуковой очистки выхлопных газов осуществляется следующим образом: предлагаемое устройство устанавливается в транспортное средство путем монтажа в систему выпуска выхлопных газов; при работе двигателя внутреннего сгорания транспортного средства, продукты сгорания (выхлопные газы) попадают в систему выпуска выхлопных газов, где они через впускной патрубков 1 проходят через первую 4 и вторую 5 коагуляционные камеры предлагаемого устройства; в верхних частях коагуляционных камер установлены излучатели ультразвуковых колебаний 6, которые механически и акустически связаны с ультразвуковыми преобразователями 7; в коагуляционных камерах установлены также верхние 8 и нижние отражатели 9 ультразвуковых колебаний, позволяющие создать в камерах ультразвуковые поля с

резонансным распространением ультразвуковых колебаний; очистка выхлопных газов от твердых частиц происходит за счет созданных ультразвуковых полей в коагуляционных камерах; колебания в ультразвуковых полях влияют на твердые частицы, которые начинают активно двигаться, соударяются и слипаются (происходит ультразвуковая коагуляция); для сдерживания скоагулированных частиц на выходах с камер установлены фильтрационные сетки 14, которые также очищаются при помощи ультразвуковых полей; удаление скоагулировавших частиц осуществляется через отверстия 10 в нижних отражателях; частицы оседают в накопительных емкостях 11 и 12, где часть газов конденсируется и сливается через отверстия с пробкой 13; очищенные газы выпускаются с патрубка 2. Таким образом, предлагаемое устройство повышает экологическую безопасность транспортных средств при работе двигателей внутреннего сгорания.

Один из вариантов устройства очистки отработавших газов с динамической системой ультразвукового воздействия приведен на рисунке 4.4, состоящей из корпуса 1 в виде трубы круглого сечения внутри которого размещены механизм вращения 6, обеспечивающий свободное вращение ультразвукового излучателя 4 с трехлопастным винтом 3, который крепится в устройстве на трёх стойках 5, расположенных под углом 120°. Передача электрических сигналов от ультразвукового генератора на излучатель производится с помощью вращающегося контактного устройства (ВКУ) 7.



1 – впускной патрубок; 2 – корпус; 3 – ультразвуковой излучатель;
 4 – лопастной винт; 5 – стойка; 6 – механизм вращения; 7 – ВКУ;
 8 – выпускной патрубок; 9 - место сбора и извлечения сажевых частиц

Рисунок 4.4 - Устройство очистки отработавших газов с динамической системой ультразвукового воздействия

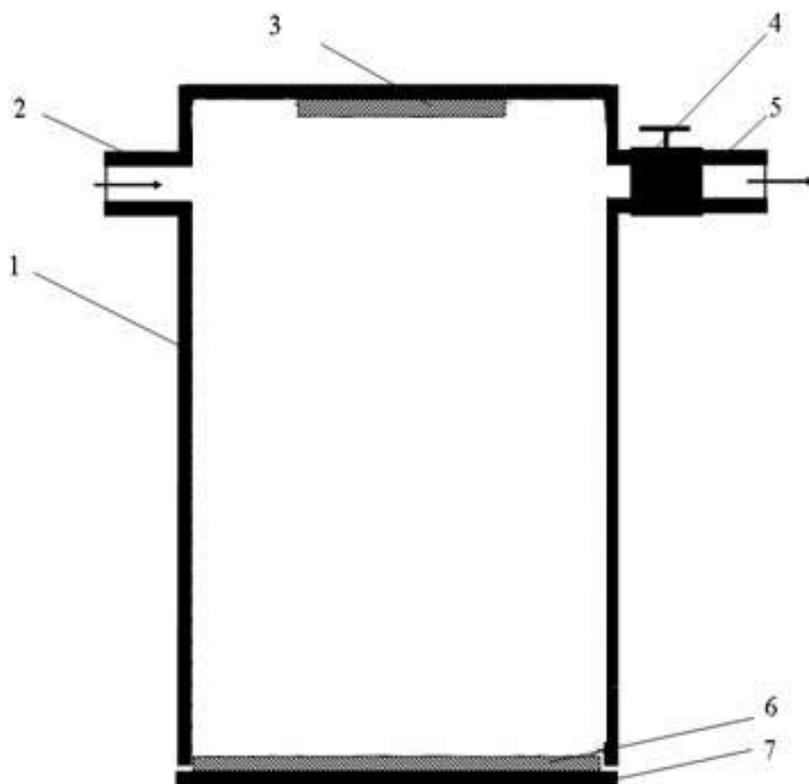
Металлические лопасти винта распространяют ультразвуковые волны от ультразвукового излучателя, как по ходу, так и против хода движения выхлопных газов и по окружности, т.к. имеют возможность вращаться под действием движущегося потока выхлопного газа, уменьшая при этом

динамическое сопротивление прохождению выхлопного газа через устройство. Укрупненные в результате коагулирующего ультразвукового воздействия частицы оседают в месте сбора и извлечения сажевых частиц 9, а очищенный газ выводится в атмосферу через выпускной патрубок 8 [97].

Устройства накопительного типа могут быть как одноёмкостные, так и многоёмкостные, с вертикальным и горизонтальным расположением ультразвукового оборудования.

В многоёмкостных устройствах заполнение ёмкостей происходит попеременно – последовательно, что обеспечивает большую эффективность очистки за счет увеличения времени обработки выхлопного газа в накопительной ёмкости на величину времени заполнения последующих ёмкостей.

Нами предлагается запатентованное нами устройство для ультразвуковой очистки отработавших газов (рисунок 4.5), содержащее накопительную ёмкость с впускным патрубком и выпускным патрубком с перепускным клапаном, отличающееся тем, что в накопительной ёмкости смонтирован ультразвуковой генератор, в нижней части имеется отражатель звуковых волн, а поддон устройства выполнен съёмным [99, 97, 100].



1 – накопительная ёмкость; 2 – впускной патрубок; 3 – ультразвуковой генератор; 4 – перепускной клапан; 5 – выпускной патрубок; 6 – отражатель звуковых волн; 7 – поддон

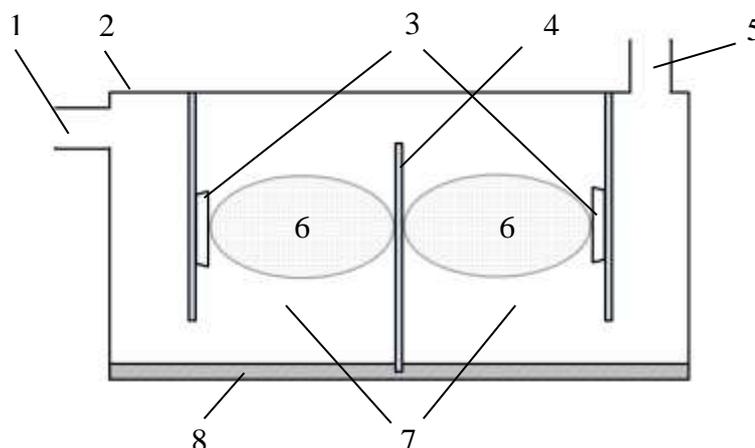
Рисунок 4.5 – Устройство ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов с вертикальным расположением ультразвукового оборудования

При разработке оборудования были использованы полученные патенты [17, 19].

Устройство (рисунок 4.5) работает следующим образом. В накопительную емкость 1 через впускной патрубок 2 поступает выхлопной газ. От ультразвукового генератора 3, расположенного сверху, возникает прямая волна. На поддоне 7 емкости располагается отражатель звуковых волн 6. При отражении прямая и отраженная волны движутся навстречу друг другу, возникает интерференция и образуется стоячая волна.

Через рассчитанный период времени газ с уменьшенным содержанием загрязняющих веществ выпускается в атмосферу перепускным клапаном 4 через выпускной патрубок 5, поддон емкости 7 с отражателем звуковых волн 6 снимается и очищается от сажи. В данном устройстве реализовано вертикальное расположение ультразвукового оборудования.

Также нами предлагается устройство очистки отработавших газов с горизонтальным расположением ультразвукового оборудования. Данная конструкция позволяет использовать устройство в режиме оборудования очистки как проточного, так и режиме накопительного типа, т.е. является устройством комбинированного типа. Схема устройства приведена на рисунке 4.6 [101, 97].



1 – впускной патрубок; 2 – корпус; 3 – ультразвуковой излучатель;
4 – звукоотражающая перегородка; 5 – выпускной патрубок; 6 – зона стоячих волн; 7 – коагуляционные камеры; 8 – поддон

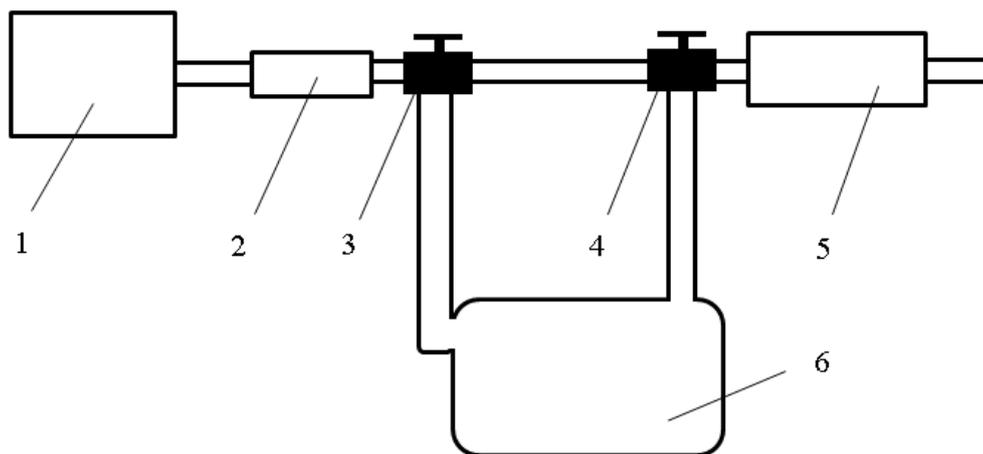
Рисунок 4.6 – Устройство очистки отработавших газов комбинированного типа с горизонтальным расположением ультразвукового оборудования

В режиме очистки как устройства накопительного типа принцип работы такой же, как и в предыдущей конструкции. В случае работы данного устройства, как устройства проточного типа, оно работает следующим образом. Выхлопной газ в устройстве проходит через две коагуляционные камеры 7, в которых ультразвуковые колебания, создаваемые

ультразвуковыми излучателями, отражаясь от звукоотражающей перегородки 4 создают зоны стоячих волн 6 с высоким коагулирующим воздействием. При изменении направления движения газового потока сверху вниз утяжеленные частицы осаживаются на съемный поддон 8 устройства, которое периодически извлекается и очищается от накопившейся сажи, которая в свою очередь утилизируется.

Схема подключения оборудования ультразвуковой очистки отработавших газов автотранспорта представлена на рисунке 4.7 [4, 90].

Оборудование работает в активном и пассивном режимах. В пассивном режиме клапаны 3 и 4 (рисунок 4.7) пропускают отработавший газ от резонатора 2 к глушителю 5 минуя накопительную емкость оборудования. Во время прогрева двигателя, движения на подъем, разгоне или при подъезде транспортного средства к остановке, устройство переключается в активный режим – впускной клапан 3 переводится в режим наполнения емкости, выпускной клапан устройства 4 перекрывает выпуск из накопительной емкости и газ накапливается в ёмкости 6, т.е. происходит временная изоляция выхлопных газов от выброса в атмосферу на период остановки транспортного средства и некоторого времени, после трогания с места.



1 – двигатель; 2 – резонатор; 3 – впускной клапан; 4 – выпускной клапан;
5 – глушитель; 6 – ультразвуковое устройство очистки.

Рисунок 4.7 - Схема установки оборудования ультразвуковой очистки отработавших газов автотранспорта.

В тот же самый момент включается ультразвуковое устройство и в ёмкости происходит ультразвуковая коагуляция частиц сажи, сопровождаемая их утяжелением и осаживанием. Через заданный промежуток времени, например при отдалении автомобиля от места скопления транспорта, автобуса от автобусной остановки на достаточное расстояние или по достижении определенного давления в ёмкости, устанавливаемого критическим режимом заполнения, выпускной клапан

открывается и происходит выпуск очищенного отработавшего газа через глушитель 5 и какое-либо фильтрующее устройство в атмосферу.

Все приведенные выше устройства не только позволяют седиментировать укрупненные в результате коагуляции частицы сажи, но и повышают эффективность последующей фильтрации, т.к. эффективность многих фильтров во многом зависит от дисперсности частиц. Например, в циклонах для 90%-ной эффективности очистки необходимо, чтобы диаметр частиц был более 30 мкм. При меньших размерах эффективность фильтрации резко снижается [11, 12]. За счет ультразвуковой коагуляции диаметр сажевых частиц увеличивается, что повышает эффективность работы фильтрующего элемента.

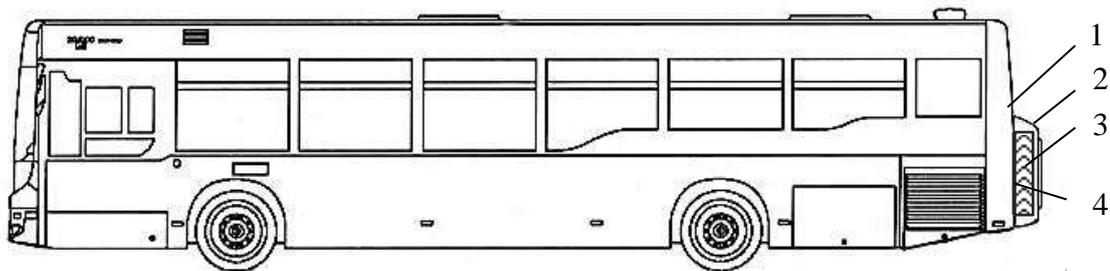
Все вышеприведенные устройства могут использоваться не только для очистки выхлопных газов ДВС транспортной техники, но и в системах вентиляции производственных помещений автотранспортных предприятий, станций технического обслуживания. При разработке и эксплуатации ультразвуковых устройств необходимо, чтобы они удовлетворяли требованиям ГОСТ [102, 103, 104, 105] и СанПиН [106].

4.2 Конструктивные решения установки устройства ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов на примере автобуса

Поскольку быстрая замена подвижного состава автомобильного транспорта и самое главное городского пассажирского транспорта на новый, более экологически чистый транспорт практически невозможна, в целях снижения вредных выбросов отработавших газов и их утилизации предлагается оборудовать пассажирские автобусы устройствами ультразвуковой очистки отработавших газов автотранспорта. Для этого необходимо определить место расположения накопительной ёмкости максимально возможного объема при условии допустимого изменения габаритов транспортного средства.

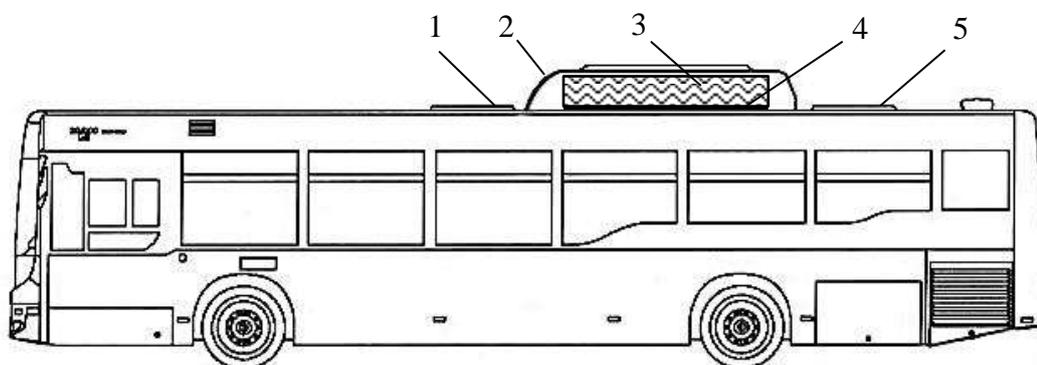
На основе анализа конструкций городских автобусов предлагается устанавливать устройство либо в задней части транспортного средства в виде дополнительного элемента закрытого декоративной, звукоизолирующей панелью с задними внешними световыми приборами, либо на крыше автобуса между вентиляционными люками со звукоизолирующим кожухом, имеющим обтекаемую форму, снижающим аэродинамическое сопротивление установленной накопительной ёмкости. Накопительная ёмкость со звукоизолирующей прокладкой должна крепиться к крыше или задней панели кузова демпферным соединением, исключая передачу ультразвуковых колебаний.

Варианты конструктивных решений установки ультразвуковой очистки отработавших газов представлены на рисунках 4.8, 4.9.



1 – задняя панель автобуса; 2 – звукоизолирующий кожух; 3 - ультразвуковое устройство очистки отработавших газов; 4 – звукоизолирующая прокладка

Рисунок 4.8 – Размещение ультразвукового оборудования в задней части автобуса



1, 5 – вентиляционные люки автобуса; 2 – звукоизолирующий кожух;
3 – ультразвуковое устройство очистки отработавших газов;
4 – звукоизолирующая прокладка

Рисунок 4.9 – Размещение ультразвукового оборудования на крыше автобуса

Оснащение городских автобусов устройствами ультразвуковой очистки позволит ограничить поступление в атмосферу отработавших газов, снижая при этом концентрацию вредных веществ в воздухе в местах наибольшего скопления транспортных средств (автобусные остановки, перекрестки и т.п.).

4.3 Методика расчета системы утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания

Методика расчета ультразвукового оборудования включает в себя:

- определение расстояния между излучателем и отражателем ультразвука для образования стоячих волн, при которых процесс коагуляции происходит наиболее эффективно;

- проверку соблюдения условий коагуляции и определение размеров мелкодисперсных частиц, наиболее подверженных ультразвуковой коагуляции при заданных параметрах ультразвукового оборудования;

- расчёт необходимого времени воздействия на отработавшие газы для заданной степени очистки с целью определения требуемого объёма накопительной ёмкости.

Для образования стоячих волн необходимо, чтобы расстояние между излучателем и отражателем ультразвуковых волн было кратно половине длины волны. Расчет производится исходя из характеристик ультразвукового оборудования.

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (4.1)$$

где v – скорость звука, $v = 300$ м/с

f – частота колебаний, Гц

Для ультразвукового оборудования с частотой излучения ультразвуковых волн 28 кГц:

$$\lambda = \frac{300}{28000} = 10,7 \text{ мм}$$

Таким образом, расстояние между излучателем и отражателем должно определяться по формуле:

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot i \quad (4.2)$$

где $i = 1, 2, 3 \dots$

При проведении эксперимента обеспечивалось расстояние между ультразвуковым излучателем и отражателем 321 мм, т.е. 60 – кратная величина $\frac{\lambda}{2} = 5,35$ мм, что удовлетворяет условию образования стоячих волн.

Степень участия частицы в звуковых колебаниях в случае стоячей звуковой волны согласно (2.11) определяется как:

$$\frac{U_{\text{ч}}}{U_{\text{г}}} = \frac{1}{[(4\pi\rho r^2 f/9\eta)^2 + 1]^{1/2}},$$

где $U_{\text{ч}}$, $U_{\text{г}}$ – соответственно амплитуды колебаний частицы и газа;

ρ – плотность частицы;

r – радиус частицы;

f – частота колебаний газа под действием ультразвука;

η – динамическая вязкость.

Из формулы (2.6) коэффициента увлечения Z , который при эффективном протекании коагуляционных процессов должен быть от 0,54 до 3,51 [65 стр. 490], определим диапазон радиусов частиц на которое наиболее эффективно воздействует ультразвуковое оборудование. При этом примем $\rho=1900 \text{ кг/м}^3$; $f=28000 \text{ Гц}$; $\eta=0,00017$.

$$r = \sqrt{\frac{Z \cdot \eta}{\rho \cdot f}} \quad (4.2)$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{0,54 \cdot 0,00017}{1900 \cdot 28000}} = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,31 \text{ мкм}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{3,51 \cdot 0,00017}{1900 \cdot 28000}} = 3,34 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 3,34 \text{ мкм}$$

Степень участия частицы в звуковых колебаниях в случае стоячей звуковой волны $\frac{U_{\text{ч}}}{U_{\text{г}}}$:

- для частиц радиусом $r_1=1,31\text{мкм}$:

$$\frac{U_{\text{ч}}}{U_{\text{г}}} = \frac{1}{[(4 \cdot 3,14 \cdot 1900 \cdot (1,31 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 28000 / 9 \cdot 0,00017)^2 + 1]^{1/2}} = 0,8$$

- для частиц радиусом $r_2=3,34\text{мкм}$:

$$\frac{U_{\text{ч}}}{U_{\text{г}}} = \frac{1}{[(4 \cdot 3,14 \cdot 1900 \cdot (3,34 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 28000 / 9 \cdot 0,00017)^2 + 1]^{1/2}} = 0,2$$

Полученные результаты свидетельствует о соблюдении условия возникновения ультразвуковой коагуляции и говорит о высокоэффективном протекании коагуляционных процессов мелкодисперсных частиц отработавших газов радиусом от 1,31 до 3,34 мкм. При этом для частиц размером менее 3,34 мкм характерен преимущественно ортокинетический коагуляционный процесс. Частицы большего размера взаимодействуют между собой под действием гидродинамических сил (гидродинамическая коагуляция).

Для определения объема накопительной ёмкости (ёмкостей), требуемого для наиболее эффективной работы оборудования ультразвуковой очистки, необходимо определить рациональное время обработки выхлопного газа

ультразвуком. Принимаем весь объем сажи, имеющейся в ёмкости, как во взвешенном состоянии, так и осевшую на дно устройства в результате коагуляции за единицу, и определяем, какая часть твердых частиц осаждается, используя формулу (2.4) зависимости счетных концентраций взвешенных твердых частиц газа: $n = n_0 \exp(-kt)$ и полученную зависимость (3.35) изменения коэффициента коагуляции. Величина $s = 1 - n$ характеризует количество седиментированных твердых частиц и определяет степень очистки выхлопных газов от твердых частиц. Предполагая, что в начальный момент времени $t = 0$ все частицы сажи находятся во взвешенном состоянии $n_0 = 1, s = 0$.

$$n = n_0 \exp(-(-0,0000012t^3 + 0,0012994t^2 - 0,4562322t + 69,3) \cdot 10^{-4}) \cdot t). \quad (4.3)$$

$$s = 1 - n_0 \exp(-(-0,0000012t^3 + 0,0012994t^2 - 0,4562322t + 69,3) \cdot 10^{-4}) \cdot t). \quad (4.4)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Расчет степени очистки s выхлопных газов s в зависимости от времени облучения ультразвуком

| t | k | n_0 | n | s |
|-----|----------|-------|------|------|
| 0 | 0,00693 | 1,00 | 1 | 0 |
| 60 | 0,004634 | 1,00 | 0,76 | 0,24 |
| 120 | 0,003119 | 0,76 | 0,52 | 0,48 |
| 180 | 0,002228 | 0,52 | 0,35 | 0,65 |
| 240 | 0,001806 | 0,35 | 0,23 | 0,77 |
| 300 | 0,001698 | 0,23 | 0,14 | 0,86 |
| 360 | 0,001747 | 0,14 | 0,07 | 0,93 |
| 420 | 0,001799 | 0,07 | 0,03 | 0,97 |
| 480 | 0,001698 | 0,03 | 0,02 | 0,98 |
| 540 | 0,001288 | 0,02 | 0,01 | 0,99 |
| 600 | 0,000414 | 0,01 | 0,01 | 0,99 |

Графики зависимости $n(t)$ и $s(t)$ приведены на рисунке 4.8

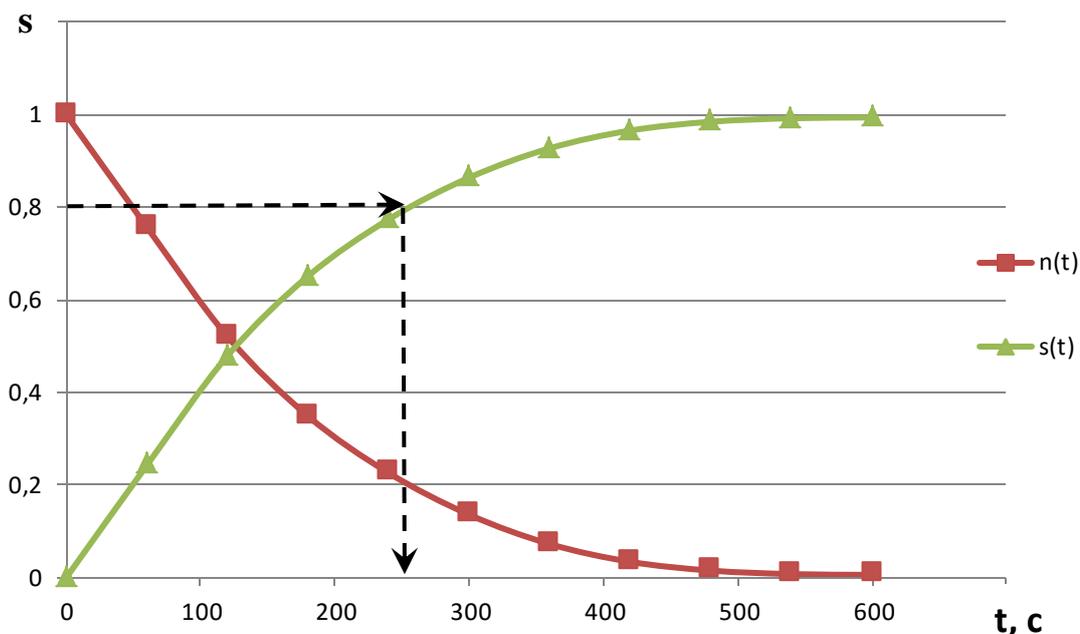


Рисунок 4.8 – Графики зависимости $n(t)$ и $s(t)$

По графику зависимости $s(t)$ (рисунок 4.8) определяем для заданной степени очистки требуемое время воздействия ультразвука. Например, для 80%-ой степени очистки необходимое время ультразвукового воздействия составит $t = 260$ с.

Методика расчета требуемого объема накопительной ёмкости изложена в работе [107].

Расчет количества седиментированных мелкодисперсных частиц производится по формуле (2.21) [4]:

$$m_c = m_0 \left(1 - e^{\ln \frac{n}{n_0}} \right) = m_0 \left(1 - \frac{n}{n_0} \right).$$

Таким образом, например, для дизельного двигателя автомобиля КамАЗ-4310, работающего на холостом ходу, концентрация сажи в выхлопных газах $0,333 \text{ г/м}^3$, на максимальных оборотах – $4,152 \text{ г/м}^3$ [108]. Соответственно на каждый 1 м^3 выхлопного газа, закаченного в ёмкость устройства, масса седиментированных твердых частиц будет составлять $0,266$ и $3,320$ г соответственно.

Приведенная методика расчета позволяет определить основные параметры ультразвукового оборудования устройств очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов, а также рассчитать количество осаждаемых мелкодисперсных сажевых частиц.

4.3 Расчет эколого-экономической эффективности устройств ультразвуковой очистки отработавших газов ДВС автотранспорта

Экономическую эффективность (Э) можно выразить через предотвращенный эколого-экономический ущерб (ΔУ), который определяется по формуле:

$$\text{Э} = \Delta\text{У} = \text{У}_1 - \text{У}_2, \text{ тенге/год}, \quad (4.5)$$

где У_1 – годовой эколого-экономический ущерб до проведения мероприятий, тенге/год;

У_2 – годовой эколого-экономический ущерб после проведения мероприятий, тенге/год.

$$\text{У} = \sigma \cdot \gamma \cdot f \cdot \text{М}, \text{ тенге/год}, \quad (4.6)$$

где σ – безразмерный показатель, учитывающий тип, загрязняемой территории ($\sigma=4$ для г. Караганды);

γ – стоимостная оценка 1 усл. т загрязняющих веществ, тенге/усл.т (принимается равной 1 МРП);

f – безразмерный коэффициент, учитывающий характер рассеивания примесей в атмосфере (т.к. автотранспорт является неорганизованным источником, показатель $f=10$);

М – приведенная масса загрязняющего вещества, усл.т/год, определяется по формуле:

$$\text{М} = \sum_{i=1}^N m_i \cdot A_i \quad (4.7)$$

где m_i – годовая масса выброса i -го вещества, т/год;

A_i – коэффициент относительной опасности i -го вещества, усл.т/т, (в данном случае для сажи $A = 20$ усл.т/т) определяется по формуле:

$$A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_i} \quad (4.8)$$

где ПДК_i – среднесуточная предельно допустимая концентрация i -го вещества, мг/м³, (ПДК сажи = 0,05 мг/м³).

Таким образом, предотвращенный эколого-экономический ущерб определяется по формуле:

$$\text{Э} = \Delta\text{У} = \sigma \cdot \gamma \cdot f \cdot A_i \cdot (m_1 - m_2) \quad (4.9)$$

где m_1 – годовая масса выброса до проведения мероприятий, т/год;

m_2 – годовая масса выброса после проведения мероприятий, т/год.

Произведём расчет эколого-экономической эффективности устройств ультразвуковой очистки отработавших газов ДВС автобусов большого класса, работающих на внутригородских перевозках.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 4.2

Таблица 4.2 – Исходные данные расчета эколого-экономической эффективности

| Показатели | Значения |
|--|----------|
| Среднесуточный пробег l_{cc} , км | 180 |
| Коэффициент выпуска α | 0,76 |
| Время в наряде, ч | 16 |
| Безразмерный показатель, учитывающий тип, загрязняемой территории β | 4 |
| Стоимостная оценка 1 усл. т загрязняющих веществ γ , тенге/усл.т | 2778 |
| Безразмерный коэффициент, учитывающий характер рассеивания примесей в атмосфере, f | 10 |
| Коэффициент относительной опасности i -го вещества A_i , усл.т/т | 20 |

Годовые массы выброса сажи до и после внедрения устройств, учитывая 80% уровень ультразвуковой очистки определим по методике, изложенной в литературе [109, 110].

Результаты расчета приведены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Расчет эколого-экономической эффективности устройств ультразвуковой очистки отработавших газов дизельных ДВС автобусов большого класса

| Показатели | Автобусы большого класса производства СНГ | | | Автобусы большого класса иностранного производства | | |
|--|---|------|---------|--|------|---------|
| | Т | БП | СП | Т | БП | СП |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Выбросы сажи автобусов большого класса при прогреве, г/мин | 0,04 | 0,16 | 0,08 | 0,02 | 0,04 | 0,03 |
| Время прогрева, мин | 1,5 | 22 | 6 | 1,5 | 22 | 6 |
| Суточный выброс сажи при прогреве, г | 0,06 | 3,52 | 0,48 | 0,03 | 0,88 | 0,18 |
| Пробеговые выбросы сажи автобусов большого класса, г/км | Т | Х | Среднее | Т | Х | Среднее |
| | 0,25 | 0,35 | 0,28 | 0,2 | 0,3 | 0,23 |
| Выбросы сажи автобусов большого класса на холостом ходу, г/мин | 0,04 | | | 0,02 | | |

Продолжение таблицы 4.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|---|----------|---|---|----------|---|
| Суточная масса сажи, выбрасываемая автобусом большого класса при прогреве, учитывая что в АТП осуществляют стоянку в теплых боксах 70% автобусов, на стоянках с подогревом - 20%, без подогрева - 10% в холодные месяцы, г | | 0,20 | | | 0,07 | |
| Суточная масса сажи, выбрасываемая автобусом большого класса на среднесуточный пробег, г | | 51,00 | | | 42,00 | |
| Суточная масса сажи, выбрасываемая автобусом большого класса на холостом ходу, учитывая, что в городских условиях $T_{хх}=0,4T_n$, г | | 15,36 | | | 7,68 | |
| Суммарный суточный выброс сажи автобуса большого класса, г | | 66,56 | | | 49,75 | |
| Годовой выброс сажи m_1 до внедрения оборудования, с учетом коэффициента выпуска, г | | 18464,67 | | | 13800,19 | |
| Годовой выброс сажи m_2 после внедрения оборудования, с учетом коэффициента выпуска, г | | 3692,93 | | | 2760,04 | |
| Экологический ущерб, тенге | | 41035,9 | | | 30669,5 | |
| Экологический ущерб после внедрения оборудования, тенге | | 8207,2 | | | 6133,9 | |
| Экономический эффект от снижения ущерба, тенге | | 32828,7 | | | 24535,6 | |

Результаты эколого-экономического расчета показывают эффективность применения устройств ультразвуковой очистки на автомобильном транспорте, особенно в условиях мест эксплуатации, подверженных наибольшему загрязнению (центральные части крупных городов, промышленные карьеры и т.п.)

4.4. Разработка технического задания на проектирование опытной конструкции ультразвуковой системы очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов

Техническое задание — исходный документ на проектирование технического объекта (изделия). Техническое задание устанавливает основное назначение разрабатываемого объекта, его технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предписание по выполнению необходимых стадий создания документации

(конструкторской, технологической, программной и т. д.) и её состав, а также специальные требования.

Техническое задание на проектирование опытной конструкции ультразвуковой системы очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов состоит из следующих разделов:

1. Область применения;
2. Цель и назначение разработки;
3. Источники разработки;
4. Технические требования, состоящий из следующих подразделов:
 - 4.1. Состав и требование к конструктивному устройству
 - 4.2. Показатели назначения
 - 4.3. Требования к технологичности
 - 4.4. Требования к уровню унификации и стандартизации.
 - 4.5. Требования к безопасности и влияния на окружающую среду
 - 4.6. Требования к эстетичности и эргономичности
 - 4.7. Требования к патентной чистоте
 - 4.8. Условия эксплуатации

Техническое задание на проектирование опытной конструкции ультразвуковой системы очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов представлено в приложении А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация содержит новые научно-обоснованные результаты, использование которых обеспечивает решение важной прикладной задачи разработки методики расчета конструктивных параметров накопительного ультразвукового устройства очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания автобусов и других видов автотранспорта.

Краткие выводы по результатам диссертационного исследования:

1) Произведенная классификация и сравнительный анализ автомобильных глушителей позволил сделать вывод об отсутствии эффективных устройств утилизации выхлопных газов городского транспорта, оснащенного ДВС;

2) Анализ способов очистки и состава отработавших газов ДВС обосновывают необходимость их утилизации за счет ультразвукового воздействия;

3) Описана физическая сущность процесса коагуляции выхлопных газов под воздействием ультразвука, состоящей из ортокинетической и гидродинамической коагуляции, понимание которой необходимо для разработки математической модели процесса утилизации отработавших газов ДВС;

4) Разработана и исследована математическая модель процесса утилизации отработавших газов ДВС, в основу которой положена формула молекулярно-кинетической теории газов. Полученная зависимость, учитывающая счетные концентрации частиц газа и сажи, изменяющихся в зависимости от времени и коэффициента коагуляции позволяет определять количество осажженной сажи и определить эффективность очистки ультразвуковым устройством отработавших газов;

5) На основе предложенной гипотезы тесной взаимосвязи содержания сажевых частиц во взвешенном состоянии и светопропускной способности определенного объема газа, введено понятие освещенности, как параметра оценки содержания сажевых частиц во взвешенном состоянии

6) Разработано экспериментальное ультразвуковое устройство накопительного типа, позволяющее производить замер светопропускной способности объема газа, находящегося в устройстве по параметру освещенности E и на основе полученных данных определять изменение концентрации сажевых частиц во взвешенном состоянии, коэффициента коагуляции по времени без воздействия ультразвука и с воздействием ультразвука

7) Проведены эксперименты на разработанном экспериментальном оборудовании и подтверждены полученные аналитическим путем результаты. При этом погрешность средних значений экспериментальных данных в сравнении с теоретическими составила 16,9% без воздействия ультразвука и 14,23% с ультразвуком.

8) Предложены конструктивные варианты использования эффекта ультразвуковой очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания автобусов и другой транспортной техники, определяющие направления дальнейших перспективных научных исследований;

9) Разработана методика расчета ёмкостного оборудования, позволяющая определять основные конструктивные параметры систем ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания;

10) Разработано техническое задание на проектирование системы ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов;

11) Произведённый расчёт эколого-экономической эффективности устройств ультразвуковой очистки и утилизации отработавших газов ДВС автотранспорта показал эффективность применения ультразвукового устройства очистки отработавших газов. При этом годовой экономический эффект от снижения экологического ущерба для автобусов большого класса производства СНГ составит 32829 тенге, для автобусов большого класса иностранного производства – 24536 тенге в расчете на один автобус.

Список использованных источников

1. Kalender S.S. (2019) Air Pollution Prevention Technologies. In: Hussain C. (eds) Handbook of Environmental Materials Management. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73645-7_109.
2. Bandyopadhyay, A. Curr Pollution Rep (2016) 2: 203. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0039-z>.
3. Kheirbek, I., Haney, J., Douglas, S. et al. Environ Health (2016) 15: 89. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0172-6>.
4. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Кадырова И.А., Аскарров Б.Ш. Результаты экспериментальных исследований работы емкостного оборудования ультразвуковой очистки отработавших газов автотранспорта // Уголь. - М.: ООО «Редакция журнала «Уголь», 2020. № 2. - С. 73-78. DOI: 10.18796/0041-5790.
5. Ибатов М.К. Безопасность автомобильного транспорта: Учебное пособие - Караганда: КарГТУ, 2004, 170 с., ISBN 9965-729-01-8 .
6. Ерохов В.И. Токсичность современных автомобилей (методы и средства снижения вредных выбросов в атмосферу): Учебник. –М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2017. – 448 с. : ил.
7. Ибатов М. К., Пак И. А., Аскарров Б. Ш., Сарсембаев Т. У., Шалаев В. В. Совершенствование методов снижения загрязнения атмосферы вредными выбросами автотранспорта // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3.; URL: <http://science-education.ru>.
8. Чернецов Д.А. Токсичность отработавших газов дизелей и их антропогенное воздействие // Вопросы современной науки и практики. - Симферополь: Университет им.В.И.Вернадского . 2010 №10. С. 54-59 .
9. Малов Р.В., Ерохов В.И., Щетинина В.А., Беляев В.Б. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. М.: Транспорт, 1982. 240 с.
10. Агеев Е.В., Щербаков А.В., Пикалов С.В. Особые условия технической эксплуатации и экологическая безопасность автомобилей: учебное пособие. - Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2015. 212 с.
11. Кульчитский А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие / Владим.гос.ун-т. Владимир, 2000. –256 с.
12. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». – Челябинск: Изд. Ю.
13. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология. М.: Высш.шк., 2003. – 273 с.
14. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
15. Варшавский И.Л., Малов Р.В. Как обезвредить отработавшие газы автомобиля. М.: Транспорт, 1968. – 128 с.

16. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Барченко Л.М. «Метод установления множеств конструкций каталитического нейтрализатора автомобиля» (произведение науки). – Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права №2228 от 02.07.2018 г.
17. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Барченко Л.М. Морфологический анализ конструкций каталитического нейтрализатора автомобиля // Новости науки Казахстана. 2018. №4. С.179-189.
18. Пак И.А., Барченко Л.М. «Патентный анализ конструкций каталитических нейтрализаторов автомобиля». – Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №2639 от 04.04.2019 г. Дата создания 20.03.2019.
19. Ибатов М.К., Пак И.А., Барченко Л.М. Морфологический анализ конструкций систем каталитической нейтрализации и очистки отработавших газов автомобиля // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №10), Караганда: КарГТУ, 2018. - С. 162 – 164.
20. Гладов Г.И., Петренко А.М. Устройство автомобилей: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 352 с. .
21. Селифонов В.В., Бирюков М.К. Устройство и техническое обслуживание автобусов. Учебник водителя транспортных средств категории «D». – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 304 с.
22. Кадыров А.С., Пак И.А., Жунусбекова Ж.Ж., Ганюков А.А., Кызылбаева Э.Ж., Карсакова А.Ж. «Классификация конструкций и сравнительный анализ автомобильных глушителей. Достоинства и недостатки». – Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №5749 от 11.10.2019 г.
23. Как работает система SCR (ADBLUE) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://trs24.ru/как-работает-система-scr-adblue> (10.09.2019).
24. Экология и экологическая безопасность автомобиля : учебник / М.В. Графкина, В.А. Михайлов, К.С. Иванов. – 2-е изд., испр. и доп. –М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2016. – 320 с. – (Профессиональное образование).
25. Экологический стандарт Евро-5: в чем отличие от Евро-4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vektornpo.ru/articles/ekologicheskij-standart-evro-5-v-chem-otlichie-ot-evro-4> (10.09.2019).
26. Батурин Н.В., Титов Д.Н., Медведев Г.В., Новоселов А.А., Грабовская Н.Н. Совершенствование конструкций дизелей и их экологические показатели // Ползуновский вестник. – 2009. – №1-2. – С. 73–80. .
27. Что такое сажевый фильтр? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://avto-blogger.ru/texchast/sazhevyj-filtr.html> (10.09.2019).

28. Töpfer, T., Weiskirch, C., Behnk, K. et al. Exhaust-gas aftertreatment concepts for meeting future emission requirements. *MTZ Worldw* 72, 16–21 (2011). <https://doi.org/10.1007/s38313-011-1034-9>.

29. Кадыров А.С., Аскарлов Б.Ш., Грузин В.В., Ибатов М.К., Кабаев Д.Д. Устройство для очистки выхлопных газов / Инновационный патент РК №26102; заявл. 27.10.2011; опубл. 14.09.2012, бюл.№9.

30. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Аскарлов Б.Ш., Кабаев Д.Д. Устройство для изоляции отработавших газов / Инновационный патент РК №26623; заявл. 27.04.2012; опубл. 25.12.2012, бюл.№12.

31. Ушаков К.З., Михайлов В.А. Аэрология карьеров. - 2-е изд. перераб. и доп. / Под ред. Ржевского В.В., М., 1985, 272 с.

32. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2016 – 2019 годы интернет–ресурсе <http://doklad.ecogofond.kz/>.

33. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Аскарлов Б.Ш., Кенесов О.М. Анализ и предложение методов очистки газов от технических загрязнений в транспортной технике // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – Усть–Каменогорск: ВКГТУ, 2018. - №4. - С.114-119.

34. Аксенов И. Я., Аксенов В. И. Транспорт и охрана окружающей среды.— М.: Транспорт, 1986.— 176 с, ил.

35. Амбарцумян В.В., Носов В.Б., Тагасов В.И. Экологическая безопасность автомобильного транспорта: учебное пособие для вузов. М.: Научтехлитиздат, 1999. 205 с.

36. Якубовский Ю. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды: Пер. с пол. – М. Транспорт, 1979. – 198 с., ил., табл.

37. Зотов ЯЛ. Экологическая безопасность автомобилей: Учеб. пособие. СПб: СЗТУ, 2005, 115 с.

38. Голохваст К. С., Чернышев В. В., Угай С. М. Выбросы автотранспорта и экология человека (обзор литературы) // Экология человека. 2016. № 1. С. 9–14.

39. Бондаренко Е.В., Дворников Г.П. Дорожно – транспортная экология: учебное пособие./ под. Ред.А.А.Цыцурь. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 113 с.

40. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». . – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 403 с. .

41. Коломнин В.В., Рыбкин В.С. Автотранспорт как приоритетный источник загрязнения атмосферного воздуха (обзор литературы) // Естественные науки. Журнал фундаментальных и прикладных исследований. Астраханский государственный университет. 2015. №1. С.26-34.

42. Павлова Е.И. Экология транспорта: Учебник для вузов. - М.: Транспорт, 2000. 248 с.
43. Кутенев В.Ф., Шюте Ю.В. Экология и токсичность двигателей внутреннего сгорания. М.: МАМИ, 2005. – 145 с.
44. Экология транспорта [Электронный ресурс] : учебное пособие / [В.Ю. Прохоров и др.]. – электрон. дан. и прогр. (6 Мб). – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 69 с.
45. Ерохов В.И. Проектирование и расчет нейтрализатора наземных транспортных средств. - М.: МГТУ «МАМИ», 2010. 45 с.
46. Сольницев Р.И., Коршунов Г.И. Системы управления «природа – техногеника». – СПб. : Политехника, 2013. – 205 с. : ил.
47. Технические основы охраны окружающей среды : курс лекций для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 1-57 01 02 «Экологический менеджмент и аудит в промышленности» : в 4 ч. / Н. Г. Малькевич, Г. И. Морзак. – Минск : БНТУ, Ч. 2 : Охрана атмосферы. – 2014. – 53 с.
48. Кормина, Л. А. Технологии очистки газовых выбросов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л. А. Кормина, Ю. С. Лазуткина. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 2.9 МБ). – Барнаул, Изд-во АлтГТУ, 2019. – Режим доступа: <http://elib.altstu.ru/uploads/ore>.
49. Коробкин В.И., Передельский Л.В. Экология. Изд. 5-е, доп. и переработ. – Ростов н/Д: изд-во «Феникс», 2003. – 576 с. (Серия «Высшее образование».).
50. Поповиченко Р.М. Автомобильный транспорт и окружающая среда : учебное пособие / М-во высшего и среднего специального образования КазССР, Карагандинский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт. - Караганда : КПТИ, 1986. - 85 с.
51. Нестеров Виктор Александрович. Повышение эффективности инерционного газоочистного оборудования наложением ультразвуковых полей высокой интенсивности. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий. Бийск, 2014, 19 с
52. Доровских Роман Сергеевич. Интенсификация процесса мокрой очистки газов наложением ультразвуковых полей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий. Бийск, 2017, 20 с.
53. Ситдикова А.А., Святова Н.В., Царева И.В. Анализ влияния выбросов автотранспорта в крупном промышленном городе на состояние загрязнения атмосферного воздуха // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19623>
54. Экологические проблемы Казахстана и пути их решения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nur.kz/fakty-i>

layfhaki/1666860-ekologicheskie-problemy-kazakhstana/. Дата обращения: 01.08.2021.

55. World Air Quality Report Region & City PM2.5 Ranking [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iqair.com/world-air-quality-report>. Дата обращения: 01.08.2021.

56. Чигаркин А. В. Геоэкология Казахстана (географические аспекты природопользования и охраны природы): учеб. пособие для ун-тов. – Алматы: Қазақ университеті, 2006. – 414 с.

57. Численность населения Республики Казахстан по полу в разрезе областей, городов, районов, районных центров и поселков на начало 2020 года. Комитет по статистике Министерства национальной экономики Республики Казахстан. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stat.gov.kz/api/getFile/?docId=ESTAT354434>/Дата обращения: 29.07.2021.

58. О.В. Гребенева, М.Ю. Алешина, Н.К. Смагулов. Современная оценка загрязнения атмосферного воздуха в г. Караганде // Медицина и экология, 2018, №3 с.26-31.

59. В. Н. Ложкин, В. В. Шульгин, Максимов М. А. О моделировании систем очистки отработавших газов ДВС с использованием нейтрализаторов и тепловых аккумуляторов фазового перехода. // Техничко-технологические проблемы сервиса, 2011, №2(16) С. 42 – 47 .

60. T. Shamim. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions // International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 475–487 (2011).

61. В.Р. Ведрученко, В.В. Крайнов, Н.В. Жданов, М.В. Кокшаров, Д.К. Кузнецова Выбор схемы утилизации тепла отработавших газов поршневых ДВС и оценка полезного теплоиспользования в составе когенерационной установки // Омский научный вестник №1(137) 2015. С. 114-119.

62. Система утилизации тепла автомобильного двигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zetsila.ru/система-утилизации-тепла-автомобиля/>. Дата обращения: 24.08.2021.

63. А. Лукин. Удобрение почвы выхлопными газами: как это работает? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://glavpahar.ru/articles/udobrenie-rochvyu-vyhlopnyimi-gazami-kak-eto-rabotaet>. Дата обращения: 18.08.2020.

64. Ибатов М.К., Пак И.А. Устройство очистки выхлопных газов транспортной техники // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 11), Караганда: КарГТУ, 2019. - С. 335 – 336.

65. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман; пер. с нем. изд. В.С. Григорьева и Л.Д. Розенберга. – М.: Издательство иностранной литературы, 1957. – 726 с.

66. Радж Балдев, Раджендран В., Паланичами П. Применения ультразвука. – М: Техносфера, 2006. – 576 с.

67. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980, 280 с.
68. Иванова Н. И. Коагуляция (рус.) // Большая российская энциклопедия. — Большая Российская энциклопедия, 2009. — Т. 14. — С. 357.
69. Химическая энциклопедия: В 5 т.; т 2; Даффа – Меди/Редкол.: Кнунянц И.Л. (гл. ред.) и др. –М.: Сов. энцикл., 1990. – 671 с.: ил.
70. Кадыров А.С., Пак И.А., Кадырова И.А., Ганюков А.А. Физика процесса ультразвуковой коагуляции выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания автотранспортной техники // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. – Павлодар: ПГУ, 2020. - №1. - С.219-230.
71. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. –М.:Химия, 1990. – 208с.:ил.
72. Стретт Дж.В. (Лорд Рэлей). Теория звука: Пер. с англ. Т. II. М.: Гостехтеоридат, 1955. 475 с.
73. Под ред. проф. Л.Д. Розенберга Физика и техника мощного ультразвука. Физические основы ультразвуковой технологии. Изд-во «Наука». Москва, 1970. – 689 с.
74. Лычников Д.С., Мартынов Г.А. О влиянии ультразвука на устойчивость гидрофобных коллоидов//ДАН СССР. 1966. Т. 167. №4. С. 855 – 857.
75. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. М.: Наука, 1972. 343 с.
76. Brandt O., Freund H., Niedemann E., Zur Theorie der akustischen Koagulation, Kolloid Zs, 77, 103 (1936).
77. Niedemann E., Einwirkung von Schall und Ultraschall auf Aerosole. Kolloid. Zs. 77, 168 (1936).
78. Brandt, O. & Freund, H. Z. Physik (1935) 94: 348. <https://doi.org/10.1007/BF01349422>.
79. Clair H W.St., Spendlove M.J., Potter E.V., Flocculation of Aerosols by Intense High-frequency Sound, Bur jf Mines, Rep. of Investigations, 4218, 27 (1948).
80. King L.V, On the Acoustic Radiation Pressure on Circular Discs. Inertia and Diffraction Corrections, Proc Roy. Soc, A 153, 1 (1935).
81. Clair H.W., Agglomeration of Smoke, Fog or Dust Particles by Sonic Waves, Ind. Eng. Chem, 41, 2434 (1949).
82. Kiddoo, Gordon, Sonic agglomeration, A New Solution, Chem Eng, 58, 154 (1951).
83. Под ред. Голяминой И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с., илл.
84. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 241 с.

85. Juan A. Gallego-Juarez, Karl F. Graff. Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Elsevier, 2014. 1166 p.
86. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. – Мн.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
87. Степин В.С., Елсуков А.Н. Методы научного познания. Минск: «Высшая школа», 1974. – 152 с.
88. Шенк Х., Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. – 381 с.
89. Ибатов М.К., Баурова Н.И., Пак И.А. Экспериментальное исследование ультразвуковой очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания // Materials of the XVI Int. scien. and prac. conf. «Cutting-edge science – 2020», Sheffield: Science and Education LTD, 2020. - Vol.8. - С. 95 – 99.
90. Kadyrov A., Ganyukov A., Pak I., Suleyev B., Balabekova K. Theoretical and Experimental Study of Operation of the Tank Equipment for Ultrasonic Purification of the Internal Combustion Engine Exhaust Gases // Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 23(3), B219-B226. <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.3.B219-B226>.
91. Под общ. ред. В.И. Ермакова. Общий курс высшей математики для экономистов: Учебник. – М. ИНФРА-М, 2007. – 656 с. .
92. А.С. Кадыров, И.А. Кадырова. Основы научных исследований: Монография. Карагандинский государственный технический университет. - Караганда: Изд-во КарГТУ, 2015. –278 с.
93. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика: Учебник. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. — 352 с.
94. В. М. Заварыкин, В. Г. Житомирский, М. П. Лапчик. Численные методы: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. спец. пед. ин-тов. - М.: Просвещение. 1990. - 176 с.; .
95. Куприенко Н. В. Статистические методы изучения связей. Корреляционно-регрессионный анализ/ Н. В. Куприенко, О. А. Пономарева, Д. В. Тихонов. СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 118
96. Кадыров А.С., Пак И.А., Сарсембеков Б.К. Исследование ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания // Материали XV Межд. научн. практ. конф. «Бъдещето въпроси от света на науката – 2019», София: «Бял ГРАД-БГ ООД», 2019. - Vol.13. - С. 76 – 80.
97. Ибатов М.К., Баурова Н.И., Пак И.А. Конструктивные варианты устройств ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания // Труды Университета. – Караганда: КарТУ, 2021. - №1. - С. 110-116.
98. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Балабаев О.Т., Аскарров Б.Ш., Пак И.А. Устройство для ультразвуковой очистки выхлопных газов / Патент на полезную модель РК №3194; заявл. 20.12.2017; опубл. 15.10.18, бюл.№38.
99. Пак И.А., Ибатов М.К. «Экспериментальная установка ультразвуковой очистки выхлопных газов». Дата создания 15.03.2020 г. –

Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №8888 от 17.03.2020 г. .

100. Пак И.А., Ибатов М.К., Кадырова И.А., Ганюков А.А., Балабекова К.Г. Накопительное устройство ультразвуковой очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания / Патент на полезную модель РК №6568; заявл. 06.09.2021; опубл. 22.10.21, бюл. №42

101. Пак И.А., Ибатов М.К., Баурова Н.И. Устройства ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания транспортной техники // Труды Междунар. науч.-практ. online конф. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №12), Караганда: КарГТУ, 2020. - Ч.2. - С. 634 – 636.

102. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

103. ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) Вибрационная безопасность Общие требования.

104. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.

105. ГОСТ 12.1.001-89 “ССБТ. Ультразвук. Общие требования безопасности”.

106. СанПиН № 1.01.002-94 "Санитарные правила организации технологических процессов и гигиенические требования к производственному оборудованию".

107. Ибатов М.К., Алиев С.Б., Балабаев О.Т., Аскарров Б.Ш. Основные результаты экспериментальных исследований изоляции отработавших газов ДВС карьерных тепловозов. // Уголь. - М.: ООО «Редакция журнала «Уголь», 2019. - №7. - С.28-30.

108. Третьяк Л.Н., Вольнов А.С., Косых Д.А. Состав и концентрации твердых частиц в отработавших газах как критерии технического состояния двигателей внутреннего сгорания // - М.: Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-21. – С. 4625-4634; <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38041>

109. Экологическая экспертиза и экологический аудит : учебник и практикум для СПО / Е.Ю. Колесников, Т.М. Колесникова. 2 изд. пер. и доп. –М .: Издательство Юрайт, 2019. –469 с. – (Серия: Профессиональное образование).

110. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных предприятий / Приложение № 3 к Приказу Министра охраны окружающей среды Республики Казахстан от «18» апреля 2008 года № 100-п.

111. Никифоров Л.Л. , Персиянов В.В. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. - М: Дашков и К°, 2017. -497 с.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на проектирование опытной конструкции ультразвуковой системы очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов

Дата разработки 10.05.2021

1. Область применения

Опытная конструкция ультразвуковой системы очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов предназначена для очистки отработавших газов от мелкодисперсных твердых частиц, преимущественно сажи, и её утилизации.

2. Цель и назначение разработки

Целью создаваемой опытной конструкции является снижение вредных выбросов мелкодисперсных твердых частиц в атмосферу в процессе работы двигателей внутреннего сгорания городских автобусов.

3. Источники разработки

1. Отчет по научно-исследовательской работе «Разработка методов повышения ресурса автомобильных глушителей» докторанта специальности 6D071300 «Транспорт, транспортная техника и технологии» за 2017-2018 уч.год

2. Отчет по научно-исследовательской работе «Разработка методов повышения ресурса автомобильных глушителей» докторанта специальности 6D071300 «Транспорт, транспортная техника и технологии» за 2018-2019 уч.год.

3. Инновационный патент РК №26102 Устройство для очистки выхлопных газов / Кадыров Адиль Суратович; Аскарлов Бахтияр Шарапиденович Грузин Владимир Васильевич Ибатов Марат Кенесович; Кабаев Дидар Дауырович; заявл. 27.10.2011; опубл. 14.09.2012, бюл.№9

4. Инновационный патент РК №26623 Устройство для изоляции отработавших газов / Ибатов Марат Кенесович; Кадыров Адиль Суратович; Пак Игорь Анатольевич; Аскарлов Бахтияр Шарапиденович Кабаев Дидар Дауырович; заявл. 27.04.2012; опубл. 25.12.2012, бюл.№12

5. Патент на полезную модель РК №3194. Устройство для ультразвуковой очистки выхлопных газов / Ибатов Марат Кенесович Кадыров Адиль Суратович; Балабаев Оюм Темиргалиевич Аскарлов Бахтияр Шарапиденович; Пак Игорь Анатольевич заявл. 20.12.2017; опубл. 15.10.2018, бюл.№38

Разработал



6. Патент на полезную модель РК №6568. Накопительное устройство ультразвуковой очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания / Пак И.А., Ибатов М.К., Кадырова И.А., Ганюков А.А., Балабекова К.Г. заявл. 06.09.2021; опубл. 22.10.21

7. Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права №1814 от 07.06.2018 г. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Аскараров Б.Ш., Ганюков А.А. «Методика расчета заполнения выхлопными газами ёмкости для изоляции отработавших газов тепловозного двигателя»

8. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №5749 от 11 октября 2019 г. Кадыров А.С., Пак И.А., Жунусбекова Ж.Ж., Ганюков А.А., Кызылбаева Э.Ж., Карсакова А.Ж. «Классификация конструкций и сравнительный анализ автомобильных глушителей. Достоинства и недостатки». Дата создания 06.09.2019 г.

9. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №8888 от 17.03.2020 г. Пак И.А., Ибатов М.К. «Экспериментальная установка ультразвуковой очистки выхлопных газов». Дата создания 15.03.2020 г.

10. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №17183 от 04.05.2021 г. Пак И.А., Ибатов М.К., Кадыров А.С. «Методика расчета ультразвукового оборудования системы утилизации отработавших газов ДВС». Дата создания 29.04.2021 г.

11. Ибатов М.К., Пак И.А. Устройство очистки выхлопных газов транспортной техники // Труды Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 11), 14-15 июня 2019 г. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2019. – 429 с.; стр. 335 – 336

12. Ибатов М.К., Баурова Н.И., Пак И.А. Экспериментальное исследование ультразвуковой очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Передовая наука - 2020», 30 апреля - 7 мая 2020 г. – Sheffield. Science and education LTD, 2019. – 116 с.; стр. 95 – 99 <http://www.rusnauka.com/pdf/281517.pdf>

4. Технические требования

4.1 Состав и требование к конструктивному устройству

Ультразвуковая система очистки отработавших газов является дополнительным оборудованием, подключаемым в систему выпуска отработавших газов двигателей внутреннего сгорания ~~автомобильных~~

Разработал



средств и состоит из входного и выходного патрубков с клапанами, ультразвукового устройства очистки отработавших газов.

Ультразвуковое устройство представляет собой накопительную емкость с впускным патрубком и выпускным патрубком с перепускными клапанами. В накопительной емкости смонтирован излучатель ультразвуковых волн, в нижней части имеется отражатель звуковых волн, а поддон устройства выполнен съемным. Генератор ультразвуковых импульсов соединен с излучателем посредством проводов. Управление работой ультразвукового генератора и перепускными клапанами должно осуществляться посредством управляющего устройства, которое, анализируя давление в накопительной ёмкости, а также режим работы двигателя производит заполнение накопительной ёмкости с одновременным включением ультразвукового оборудования и выпуск очищенного газа, управляя работой перепускных клапанов. В накопительной ёмкости необходима установка предохранительного клапана, срабатывающего при достижении критического давления в ёмкости.

Накопительная ёмкость должна органично вписываться в конструкцию автомобиля без существенного изменения его конструкции, габаритных размеров и обеспечивать работу в активном режиме в пределах 4 – 5 минут. Внутренняя поверхность накопительной ёмкости должна быть коррозионностойкой. Отражатель должен быть изготовлен из звукоотражающего материала. Расстояние между отражателем и излучателем ультразвуковых волн должно обеспечивать создание стоячей ультразвуковой волны для наиболее эффективного протекания коагуляционных процессов.

4.2 Показатели назначения

Показатели назначения представлены в виде таблицы 1-3

Таблица 1 Технические характеристики эксплуатации

| № | Наименование параметра | Значение параметра |
|---|--|--------------------|
| 1 | Частота, кГц | 28 |
| 2 | Расстояние между излучателем и отражателем, мм | 350 |
| 3 | Мощность выходного излучения, Вт | 50-100 |
| 4 | Продолжительность ультразвукового воздействия, мин | 4-5 |

Таблица 2 Рациональные параметры автобусов

| № | Наименование параметра | Значение параметра |
|---|------------------------|--------------------|
| 1 | Класс автобусов | |

Разработал



звукопоглощающим материалом (рубероид, техническая резина, пластмасса типа “Агат”, антивибрит), а также гетинакса толщиной 5 мм;

- устройством экранов, в том числе прозрачных, между оборудованием и работающим;
- размещением ультразвуковых установок в специальных помещениях или кабинах, если перечисленными выше мероприятиями невозможно получить необходимый эффект. [111]

4.6 Требования к эстетичности и эргономичности

Устройство должно отвечать требованиям технической эстетики: композиционной целостности формы, функциональной целесообразности формы, товарному виду.

На стадии эскизного проекта необходимо выполнение вариантов общekomпоновочного художественно-конструкторского решения объекта разработки, поисковых макетов в произвольном масштабе.

На стадии технического проекта необходимо выполнение окончательного варианта художественно-конструкторского решения компоновочных чертежей макета объекта разработки, пояснительной записки.

Должен обеспечиваться удобный доступ к электрооборудованию, регулировке параметров и обслуживанию ультразвуковой системы. Органы управления системой должны быть выведены на рабочее место водителя.

4.7 Требования к патентной чистоте

Система ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания должна обладать патентной чистотой по отношению к следующим странам Россия, Китай, Белоруссия

4.8 Условия эксплуатации

Производительная работа системы, её надежность и долговечность зависит от квалификации обслуживающего персонала и соблюдения правил эксплуатации. Обслуживание системы должно осуществляться операторами соответствующей квалификации.

Все элементы систем должны быть работоспособны при температуре окружающей среды от -30° до $+70^{\circ}$ С, при влажности воздуха до 98%

Система должна проходить периодическое техническое обслуживание. Периодичность технических обслуживаний должна быть кратной периодичности технических обслуживании и текущих ремонтов автобуса.

Разработал



Приложение Б

Патенты, свидетельства о государственной регистрации прав на объект авторского права, свидетельства о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 6568

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2021/0854.2

(22) 06.09.2021

(45) 22.10.2021

(54) Іштен жану қозғалтқыштарының пайдаланылған газдарын ультрадыбыстық тазартудың жинақтаушы құрылғысы
Накопительное устройство ультразвуковой очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания
Storage device for ultrasonic cleaning of engine exhaust of internal combustion

(73) Пак Игорь Анатольевич (KZ)
Pak Igor Anatolyevich (KZ)

(72) Пак Игорь Анатольевич (KZ)
Ибагов Марат Кенесович (KZ)
Кадырова Ирина Адильевна (KZ)
Ганюков Александр Анатольевич (KZ)
Балабекова Кырмызы Гинаятовна (KZ)

Pak Igor Anatolyevich (KZ)
Ibatov Marat Kenesovich (KZ)
Kadyrova Irina Adilevna (KZ)
Ganyukov Aleksandr Anatolyevich (KZ)
Balabekova Kyrmyzy Ginayatovna (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Е. Оспанов
E. Оспанов
Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации прав
на объект авторского права

№ 2228

2 июля 2018 г.

Настоящим удостоверяется, что в Министерстве юстиции Республики Казахстан зарегистрированы исключительные имущественные права на объект авторского права под названием «**Метод установления множеств конструкций каталитического нейтрализатора автомобиля**» (произведение науки), авторами которого по заявлению авторов являются **Ибатов Марат Кенесович, Кадыров Адиль Суратович, Пак Игорь Анатольевич, Барченко Людмила Михайловна.**

По заявлению авторов исключительные имущественные права на объект авторского права, созданный **25 мая 2018** года, принадлежат **Ибатову М.К., Кадырову А.С., Пак И.А., Барченко Л.М.** и авторы гарантируют, что при создании вышеуказанного объекта не были нарушены права интеллектуальной собственности других лиц.

Запись в реестре за № 2228 от 2 июля 2018 года имеется.

Вице-министр



Н. Пан

ИС 3433

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

**АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ**

КУӘЛІК

2019 жылғы « 4 » сәуір № 2639

Автордың (лардың) жәні , аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):

ПАК ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ, БАРЧЕНКО ЛЮДМИЛА МИХАЙЛОВНА

Авторлық құқық объектісі: ғылыми туынды

Объектінің атауы: Патентный анализ конструкций каталитических нейтрализаторов автомобиля

Объектіні жасаған күні: 20.03.2019

СВИДЕТЕЛЬСТВО

**О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ**

№ 2639 от « 4 » апреля 2019 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):

ПАК ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ, БАРЧЕНКО ЛЮДМИЛА МИХАЙЛОВНА

Вид объекта авторского права: произведение науки

Название объекта: Патентный анализ конструкций каталитических нейтрализаторов автомобиля

Дата создания объекта: 20.03.2019



Құжат түлегісінің <http://www.kazpatent.kz/> сайтының
"Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады <https://copyright.kazpatent.kz>

Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП

Бағаева К. О.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 5749 от «11» октября 2019 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):
КАДЫРОВ АДИЛЬ СУРАТОВИЧ, ПАК ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ, ЖУНУСБЕКОВА ЖАНАРА
ЖҰМАШҚЫЗЫ, ГАНЮКОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ, КЫБЫБАЕВА ЭЛЬВИРА
ЖАНАБЕКОВНА, КАРСАКОВА АКБОЛЕ ЖОЛАЕВНА

Вид объекта авторского права: произведение науки

Название объекта: Классификация конструкций и сравнительный анализ автомобильных глушителей,
Достоинства и недостатки.

Дата создания объекта: 06.09.2019



Адрес: www.kazpatent.kz, сайт интернет-портала «Авторские права» www.kazpatent.kz

Подлинность документа можно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторские права» www.kazpatent.kz

Подписано ЭЦП

Абулхайров Н. А.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 8888 от «17» марта 2020 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):

ПАК ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ, ПЕБатов МАРГА КЕЛЕСОВИЧ

Вид объекта авторского права: **примысленные науки**

Название объекта: **Экспериментальная установка ультразвуковой очистки выхлопных газов**

Дата создания объекта: **15.03.2020**



Копия свидетельства по адресу: <http://www.kazpatent.kz>, отделение
"Авторыские права" Республики Казахстан, <http://www.kazpatent.kz>

Полнота документа возможна проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторские права» <http://www.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП

Куантыров Е.С.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 17183 от «4» мая 2021 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):

ПАК ШОҒЫ АНАҒО ҒЕВІШІ, НЕБАТОВ МАРҒАТ КЕНЕСОВИЧ, КАЛЫРОВ АЛИШ СУРАТОВИЧ

Вид объекта авторского права: **процессуальные науки**

Название объекта: **Методика расчета ультразвукового оборудования системы утилизации отработавших газов ДВС**

Дата создания объекта: **29.04.2021**



Адрес: www.kazpatent.kz, сайт: www.kazpatent.kz, электронная почта: info@kazpatent.kz

Подлинность документа можно проверить на сайте kazpatent.kz в разделе «Авторское право» <http://kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП

Оспанов Е.К.

Приложение В

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ТОО «Автобусный парк №3»

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор
ТОО «Автобусный парк №3»
Григорян А.М.



2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
докторанта Пак И.А., представленной на соискание
ученой степени доктора PhD

Мы, нижеподписавшиеся, директор ТОО «Автобусный парк №3» Григорян А.М. и представители Карагандинского государственного технического университета в лице руководителя НИРД д.т.н., профессора Ибатова М.К. и исполнителя НИРД докторанта Пак И.А., составили настоящий акт передачи предприятию ТОО «Автобусный парк №3» г. Караганды технической документации с описанием вариантов конструкций и методикой расчета, позволяющей устанавливать рациональные параметры ультразвуковых устройств очистки и утилизации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания городских автобусов.

В дальнейшем не подлежит взысканию денежных средств с предприятия за внедрение методики расчета устройства для утилизации отработавших газов городских автобусов.

Научный руководитель НИРД



Ибатов М.К.

Исполнитель НИРД



Пак И.А.

Приложение Г

Акт о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по академическим
вопросам НАО КарТУ
Темірбаева А.М.



2021 г.

АКТ о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы докторанта Пак И.А.

Результаты исследования докторанта Пак И.А., направленные на определение параметров ультразвукового оборудования системы утилизации отработавших газов ДВС, внедрены в учебный процесс для подготовки бакалавров, магистрантов и докторантов по специальности «Транспорт, транспортная техника и технологии».

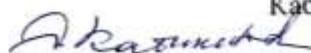
Научные и практические результаты, в частности методика расчета ультразвукового оборудования системы утилизации отработавших газов ДВС используются в методических указаниях по дисциплинам «Энергетические установки транспортной техники», «Методология и методы научных исследований», «Методы научных исследований», а также отражены в научных статьях и свидетельстве о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом.

Проректор по научной работе
НАО КарТУ, PhD



Хуанган Н.

Зав. кафедрой «Транспортная техника
и логистические системы»
к.т.н., доцент



Кабикенов С.Ж.