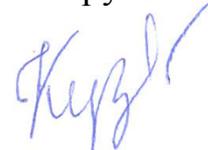


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ИМПЕРАТОРА ПЕТРА I»**

На правах рукописи



**КУЗНЕЦОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ШУМОПОДАВЛЕНИЯ В  
ГЛУШИТЕЛЯХ ТРАКТОРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

05.20. 01 – Технологии и средства  
механизации сельского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
Заслуженный работник  
Высшей школы РФ,  
доктор технических наук,  
профессор Поливаев О.И.

Воронеж – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
1. Состояние вопроса .....	13
1.1 Связь уровней шума с техническим прогрессом.....	13
1.2 Основные аспекты борьбы с шумом тракторов.....	14
1.3 Характеристика основных источников шума машинно-тракторных агрегатов.....	24
1.4 Способы снижения шума процесса выпуска .....	29
1.5 Основы применения систем активного шумоподавления в глушителях шума процесса выпуска .....	35
1.6 Выводы.....	41
2. Теоретическое исследование процессов активного снижения звуковых полей.....	43
2.1 Разработка методики определения эффективности глушителей шума активного типа.....	43
2.2 Разработка математической модели рабочего процесса глушителя шума активного типа для определения развиваемого противодействия .....	56
2.3 Методика определения наиболее рациональных геометрических параметров глушителя шума активного типа.....	62
2.4 Выводы.....	66
3. Программа и методика экспериментальных исследований.....	67
3.1 Задачи и программа исследований.....	67
3.2 Объект испытания .....	68
3.3 Методика проведения лабораторных испытаний.....	70
3.3.1 Методика тарирования тягового тензозвена.....	70
3.3.2 Методика определения передаточных коэффициентов динамических микрофонов .....	72
3.3.3 Методика лабораторных исследований эффективности блока управления.....	80

3.3.4 Методика определения аэродинамического сопротивления развиваемого глушителем.....	87
3.4 Методика проведения тяговых и полевых испытаний.....	89
4. Результаты экспериментальных исследований и их анализ.....	101
4.1 Результаты тарирования тягового тензозвена звена .....	101
4.2 Результаты определения передаточных коэффициентов динамических микрофонов .....	104
4.3 Результаты испытаний эффективности адаптивного блока управления ..	109
4.4 Результаты лабораторных исследований аэродинамических потерь, развиваемых в глушителе .....	115
4.5 Анализ результатов полевых и тяговых испытаний.....	118
4.6 Выводы.....	130
5. Экономическая целесообразность применения глушителей шума активного типа .....	132
5.1 Определение экономических показателей использования глушителей шума активного типа.....	132
5.2 Выводы.....	137
Заключение.....	138
Список сокращений и условных обозначений .....	140
Список литературы .....	141
Приложение А – Программа для расчета передаточных функций передней и задней частей глушителя .....	154
Приложение Б – Расчет гидравлических потерь в глушителе.....	162
Приложение В – Программа расчета ДПФ, автокорреляции и преобразования форматов файлов сигналов .....	165
Приложение Г – Программа расчета дискретного спектра сигнала.....	171
Приложение Д – Программа расчета взаимокорреляционной функции двух сигналов.....	174
Приложение Е – Передаточные коэффициенты динамических микрофонов .....	176

Приложение Ж - Обобщенные октавные спектры внешнего и внутреннего звуковых полей трактора при различной степени загрузки двигателя .....	179
Приложение И – Рассчитанные уровни внешнего шума выпуска, фиксируемые микрофоном.....	185
Приложение К – Патент на изобретение РФ №2445505 .....	189
Приложение Л – Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы в ОАО «Хреновской конный завод» .....	191
Приложение М – Акт поверки шумомера-анализатора спектра «Октава - 110А» .....	193
Приложение Н – Справка о внедрении в учебный процесс результатов научно-исследовательской деятельности .....	194

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Потребность в постоянном увеличении объёма выпускаемой сельскохозяйственной продукции приводит к необходимости соответствующего роста технического уровня используемых машин. Возрастание эффективности производства и снижение затрат на операции в настоящее время напрямую связано с использованием новейших образцов техники, создаваемой как в нашей стране, так и за рубежом.

Требования, предъявляемые к новым тракторам сельскохозяйственного назначения, серьёзно видоизменились относительно тех, которые были актуальными еще пару десятилетий назад. Если раньше основным критерием качества и, соответственно, конкурентоспособности техники являлась её энергонасыщенность, надежность, а также возможность агрегатирования как можно с более широким кругом сельскохозяйственных машин и орудий [36], то в настоящее время на первый план выходят такие свойства, как эргономичность и экологичность.

Множество научных публикаций подтверждают [5, 6, 15, 22, 35, 39, 34, 108], что одним из основных современных резервов повышения эффективности сельскохозяйственного производства является обеспечение наиболее комфортных условий труда для работников, качественная защита их от вредных и опасных факторов.

Среди достаточно большого количества вредных факторов есть и такие, с которыми механизаторы неизбежно сталкиваются ежедневно. С точки зрения безопасности труда виброакустические факторы (шум, вибрация) являются одними из наиболее распространенных. Вызываемые продолжительным воздействием повышенных уровней звука (УЗ) на организм операторов заболевания занимают 2-е место среди всех профзаболеваний.

Как правило, наиболее интенсивным источником шума машинно-тракторных агрегатов (МТА), определяющим уровни звукового давления как снаружи, так и внутри трактора, является процесс выпуска отработавших газов (ОГ). Частотный спектр звука данного источника имеет выраженный низкочастотный

характер, что определяет слабое его поглощение при распространении в открытом пространстве, а также при прохождении сквозь преграды и экраны.

Для качественного снижения уровней звукового давления в частотных полосах шума до 500 Гц необходимо применение пассивных глушителей с огромными габаритными размерами и массой. Это противоречит особым требованиям, предъявляемым к глушителям шума тракторной техники, поэтому весьма актуален вопрос применения новых конструкций глушителей, которые сочетали бы в себе высокую эффективность во всем диапазоне частот, низкое противодействие и незначительные массово-габаритные параметры.

Наиболее перспективным является применение системы активного шумоподавления (САШ) в глушителе, с целью улучшения его низкочастотных характеристик. Данные системы появились в середине 40-х годов в США, и до настоящего времени они постоянно совершенствуются. На сегодняшний день данные системы вобрала в себя достижения таких наук, как автоматика, электроника и акустика. Кроме этого, разрастается обширный математический аппарат, позволяющий определить границы применимости САШ и описать основные взаимосвязи их функционирования.

Применение подобных систем в условиях воздействия потока выхлопных газов в глушителях, с целью снижения шума выпуска, рассматривалось в некоторых работах лишь тезисно. Кроме этого, отсутствует математический аппарат, позволяющий выявлять эффективность подобных систем в глушителях шума.

Снижение уровней шума, генерируемого тракторами сельскохозяйственного назначения, невозможно без знаний закономерностей работы пассивных и активных компонентов глушителей шума выпуска ОГ. В соответствии с этим решение задач по снижению шума процесса выпуска ОГ, используя САШ, является актуальным.

Настоящая работа посвящена снижению внешнего шума тракторов сельскохозяйственного назначения путем установки системы активного шумоподавления в глушитель. Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный

аграрный университет имени императора Петра I» (Воронежский ГАУ) «Снижение динамических нагрузок в мобильных энергетических средствах и улучшение условий труда операторов», утвержденной ученым советом ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ» (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

**Степень разработанности темы.** Борьбе с повышенными уровнями шума и вибрации посвящено большое количество трудов отечественных ученых В. Н. Луканина, М. А. Разумовского, Н. И. Иванова, И. И. Клюкина, Ю. Ф. Устинова, С. П. Алексеева, Е. Я. Юдина, О. И. Поливаева, В. В. Шкрабак, Ю. И. Элькина и др. [5, 42, 43, 44, 49, 60, 61, 118, 121, 122]. Следует отметить, что в некоторых из данных работ имеются лишь краткие упоминания об активном способе поглощения звуковых полей, а в некоторых совсем отсутствуют.

Разработкой методик определения эффективности глушителей шума выпуска занимались многие авторы (Б. К. Шапиро [114], Р. Н. Старобинский [98], Л. С. Гильман [23], Э. Г. Бангоян [11], С. К. Белякин [13] и др.). Все приведенные авторы разрабатывали и совершенствовали методики расчета акустической эффективности глушителей шума пассивного типа, не затрагивая возможности применения активных компонентов. Использование САШ в глушителях шума выпуска рассматривалось в диссертациях А. И. Комкина [52], А. В. Васильева [17], С. Г. Семенцова [91] и А. В. Мокринского [65]. Однако в их трудах отсутствуют методики расчета эффективности глушителей шума, использующих САШ.

Исследование и анализ литературных и патентных источников показали следующее: используемые в настоящее время пассивные глушители шума выпуска обладают ограниченной эффективностью, особенно в диапазоне низких и инфрачастот, что обуславливает перспективность применения САШ в глушителях; отсутствие методик и алгоритмов расчета эффективности применения глушителей, использующих как активные, так и пассивные компоненты; отсутствие данных по влиянию параметров адаптивного блока управления на эффективность работы САШ и методик подбора их рациональных значений; отсутствие методик подбора геометрических параметров глушителей шума активного типа, обеспечивающих их максимальную эффективность.

**Объектом исследования** является процесс формирования звукового поля трактором класса тяги 2,0, оборудованного глушителем шума активного типа, в агрегате с сельскохозяйственными машинами.

**Предметом исследований** являются закономерности формирования внутренних и внешних звуковых полей машинно-тракторных агрегатов.

**Цель работы** – снижение шума тракторов сельскохозяйственного назначения применением системы активного шумоподавления в глушителях.

**Задачи исследования:**

- исследовать акустические характеристики тракторов сельскохозяйственного назначения, оборудованных серийными глушителями, и выявить наиболее интенсивные источники шума, определяющие параметры внешних и внутренних звуковых полей;
- разработать методики расчета эффективности глушителя шума, использующего систему активного шумоподавления с одним фронтальным динамиком и подбора параметров адаптивного алгоритма, реализуемого блоком управления системы активного шумоподавления;
- разработать математическую модель рабочего процесса и обосновать наиболее рациональные геометрические параметры глушителя шума активного типа тракторов сельскохозяйственного назначения;
- определить вклад шума процесса выпуска отработавших газов в формирование внешнего и внутреннего звукового поля трактора, при установленном серийном глушителе шума, а также влияние глушителя шума активного типа на уровни внешнего и внутреннего звуковых полей, создаваемых трактором.

**Научная новизна:**

- методика определения эффективности глушителя шума активного типа, отличающаяся тем, что учитывает вклад как пассивных, так и активных компонентов реактивного глушителя шума, использующего системы активного шумоподавления с одним фронтальным динамиком;
- методика определения геометрических характеристик глушителя, обеспечивающих наибольшую эффективность при его использовании, отличающаяся

тем, что учитывает передаточные функции всех компонентов как во временной, так и в частотной областях;

– математическая модель рабочего процесса глушителя шума активного типа, учитывающая влияние одного фронтального динамика, используемого системой активного шумоподавления, на аэродинамическое сопротивление;

– закономерности изменения характеристик внешних и внутренних звуковых полей тракторов сельскохозяйственного назначения при использовании глушителей шума активного типа.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Алгоритм расчета эффективности использования системы активного шумоподавления в реактивном глушителе шума тракторов, методика подбора рациональных параметров, а также аналитическая зависимость, описывающая взаимосвязь противодействия с конструктивными параметрами глушителя, углубляют знания в области теории тракторов и технической акустики.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты позволяют на стадии производства создавать конструкции наиболее подходящих для тракторов сельскохозяйственного назначения глушителей шума активного типа (ГШАТ) с точки зрения эффективности и аэродинамического сопротивления, тем самым способствуя снижению уровней шума, создаваемого новыми образцами техники, и улучшению условий труда операторов.

Предложенное техническое решение, защищенное патентом Российской Федерации, позволит повысить эффективность реактивного глушителя шума путем применения системы активного шумоподавления с одним фронтальным динамиком.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования проведены на основе методов математического моделирования, цифровой обработки сигналов, теории адаптивной фильтрации и технической акустики. Лабораторные эксперименты выполнялись по разработанной программе, для их проведения были использованы специально созданная лабораторная установка, а также имеющиеся на кафедре «Тракторы и автомобили» ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ»

учебные стенды. При проведении расчётов и обработке результатов эксперимента использовали современную вычислительную технику с установленным программным обеспечением: Microsoft Excel 2010, Mathcad 15, Microsoft Visual Studio 2012, Delphi 2009.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Методика расчета, позволяющая определить эффективность реактивного глушителя шума, использующего систему активного шумоподавления с одним фронтальным динамиком.

2. Методика поиска наиболее рациональных геометрических параметров глушителя и новое техническое решение, реализующее данные параметры в глушителе шума активного типа.

3. Математическая модель рабочего процесса глушителя шума активного типа, позволяющая определить аэродинамическое сопротивление, развиваемое глушителем, использующим систему активного шумоподавления с одним фронтальным динамиком.

4. Закономерности изменения характеристик внешних и внутренних полей при использовании глушителей шума активного типа.

**Степень достоверности результатов и апробация работы.** Результаты исследований получены с применением современных апробированных теоретических подходов, методов математического анализа, автоматического управления, цифровой обработки сигналов и технической акустики, реализацией математической модели на ЭВМ, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Достоверность результатов работы подтверждается: методологической базой исследований, проведением системного анализа решаемых задач и применением методов математического моделирования, применением современных средств вычислительной техники, результатами внедрения в производство и учебный процесс.

Результаты данной работы докладывались и обсуждались на:

- межвузовских научных конференциях на базе военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина «Перспектива XIX-XXII»(Воронеж, 2009-2014г.);
- международной научной конференции «Социально-экономические проблемы развития муниципальных образований -XV» (Нижний Новгород, 2010);
- «Национальной научно-технической конференции – I» (Москва, 2011);
- форуме «Инженеры будущего – 2011» (Иркутск, 2011);
- первом и втором этапе конкурса на лучшую научную работу среди молодых ученых (Рязань, 2013);
- конкурсах «У.М.Н.И.К» (Воронеж, 2009-2013);
- профессорско-преподавательских конференциях ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ» (Воронеж, 2009-2015);
- молодежной научно-практической конференции (Орел, 2013);
- XVIII международной студенческой научной конференции (Белгород, 2014);
- международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии и технические средства для АПК» (Воронеж, 2013).

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ОАО «Хреновской конный завод» (Воронежская область).

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ» при подготовке специалистов по направлению 23.05.01 «Эксплуатация наземных транспортно-технологических средств» и магистров по направлению 35.04.06 «Агроинженерия».

**Личный вклад соискателя.** Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследования, выборе методов, разработке методики исследований, выполнении математических преобразований и расчетов, разработке математической модели, реализации модели на ЭВМ, разработке новой конструкции

глушителя шума, создании новой лабораторной установки, выполнении экспериментальных исследований, анализе результатов.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных статьях, из которых четыре – в изданиях, включённых в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых представляются основные научные результаты диссертаций. По результатам диссертационной работы получен один патент на изобретение.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, включающих 94 рисунков и 26 таблиц, заключения, списка использованных источников, включающего 129 наименований, 12 приложений. Объем диссертации 194 страницы.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

### 1.1 Связь уровней шума с техническим прогрессом

Технический прогресс неразрывно связан с ростом уровней шума на производстве. В древние времена для повышения производительности и облегчения ручного труда человечество научилось приспособлять различного рода технические устройства. Поэтому процесс труда всегда сопровождался звуками от рабочих устройств, которые утомляли и мешали умственной деятельности. Первые упоминания о борьбе с шумом на законодательном уровне исходят из Древней Греции и Рима. Так, Цезарь, для сохранения тишины, запретил проезд повозок через столицу в ночное время [43].

В начале XX века постоянно возрастающие уровни звука, генерируемые рабочими машинами, привели к возникновению науки о борьбе с шумом – виброакустики. В этот раздел акустики внесли свой вклад многие отечественные ученые: Е. Я. Юдин, В. Н. Луканин, М. А. Разумовский, И. И. Ключкин, Р. Н. Старобинский, Н. И. Иванов, Ю. Ф. Устинов и др. [39, 42, 49, 61, 80].

В настоящее время имеется множество достижений в данной области, но при этом каждый второй житель Земли находится под действием повышенного уровня шума [91]. Машины и механизмы прочно вошли в жизненный уклад каждого, и излучаемый ими шум стал сопровождать человека не только в рабочее время, но и в моменты отдыха и сна.

Выражение известного ученого микробиолога Л. Пастера «Шум – чума XX века» можно с уверенностью отнести и к нынешнему столетию.

На сегодняшний день, например, наиболее развитые государства расходуют на борьбу с шумом транспортных средств около 1% своего бюджета. Вместе с тем, учитывая тенденцию к повышению энергонасыщенности разрабатываемых машин, с одной стороны, и необходимость снижения их шума, с другой, следует ожидать, что проблема создания малошумных машин будет становиться все более острой [52].

## 1.2 Основные аспекты борьбы с шумом тракторов

Основными источниками шума являются технические средства и установки, оснащенные двигателями внутреннего сгорания (ДВС), системы вентиляции и кондиционирования воздуха, электрифицированный инструмент и т.д. Одним из наиболее распространённых источников повышенного шума являются машинно-тракторные агрегаты (МТА). Эффективность мероприятий по снижению шума МТА необходимо рассматривать с нескольких сторон:

- для операторов – увеличение безопасности труда;
- для работодателей – улучшение социально-экономических аспектов производства;
- для производителей – повышение конкурентоспособности разрабатываемых образцов техники.

Как показывают многочисленные исследования [22, 57, 64, 80, 83, 101, 103, 105], уровень шума на рабочем месте механизаторов зачастую превышает устанавливаемые санитарными требованиями допустимые нормы.

Предприятия - изготовители тракторов, комбайнов, строительных и сельскохозяйственных машин уделяют недостаточное внимание данному вопросу, вследствие чего производимая ими новая техника, поступающая к потребителю, может представлять опасность для здоровья механизаторов.

Исследованием виброакустических характеристик современных образцов техники занимаются многие научные школы России. Создаваемый тракторной техникой шум изучается в Санкт-Петербургском, Волгоградском и Саратовском аграрных университетах под руководством соответственно В. С. Шкрабак, М. Н. Шапрова и П. И. Павлова [64, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 101, 115, 116, 118]. Всестороннее рассмотрение виброакустических характеристик тракторов содержится в монографии Разумовского М. А. [80], в которой подробно описан каждый источник шума тракторов в отдельности.

Изучению шума, генерируемого строительными и дорожными машинами (СДМ), посвящены работы Н. И. Иванова, Ю. Ф. Устинова, Ю. И. Элькина и их

учеников [11, 37, 42, 43, 44, 103, 104, 105, 106, 113, 121]. Снижением шума автомобилей занимались В.Н. Луканин со своими учениками [23, 59, 60, 61, 109] и многие другие ученые [1, 12, 39, 65, 100].

Объективным критерием оценки безопасности условий труда является частота выявления и структура профессиональной заболеваемости операторов МЭС, формирующаяся под влиянием неблагоприятных производственных факторов [21]. Так, 56,5% из общего числа профессиональных заболеваний в агропромышленном комплексе (АПК) РФ относится именно к этой категории рабочих, а интенсивный показатель выявляемости профпатологий в 3,8 раза превышает среднеотраслевой уровень (данные за 1995 г.). При этом АПК является самой неблагоприятной отраслью экономики по состоянию условий труда [35, 110, 118]. Именно здесь регистрируется 42% из всех профессиональных травм по стране, потери трудоспособности в человеко-днях составляют около 40 % от потерь всех отраслей экономики [21].

Структура профессиональной заболеваемости механизаторов в основном формируется из вибрационной болезни, заболеваний опорно-двигательного аппарата, органов дыхания и слуха (Рисунок 1).



Рисунок 1 - Структура профессиональной заболеваемости среди механизаторов

Согласно статистическим данным по Воронежской области за 2005 г. наиболее подвержены профессиональным заболеваниям (22% от общего числа больных) трактористы, бульдозеристы, машинисты экскаваторов и механизаторы: у них развивались заболевания органов слуха в 55% случаев, вибрационная болезнь – в 53% [14].

Значительную часть информации оператор МТА получает от ощущения шума и вибрации [39]. Это означает, что мероприятия по снижению УЗ в кабине тракторов влияют на скорость утомляемости и время реакции операторов, следовательно, снижают риск возникновения несчастных случаев, аварий и повышают общий уровень безопасности труда.

При определении возможных последствий воздействия источника шума на организм человека прежде всего следует рассмотреть частотную характеристику излучаемого сигнала [48] (Рисунок 2).

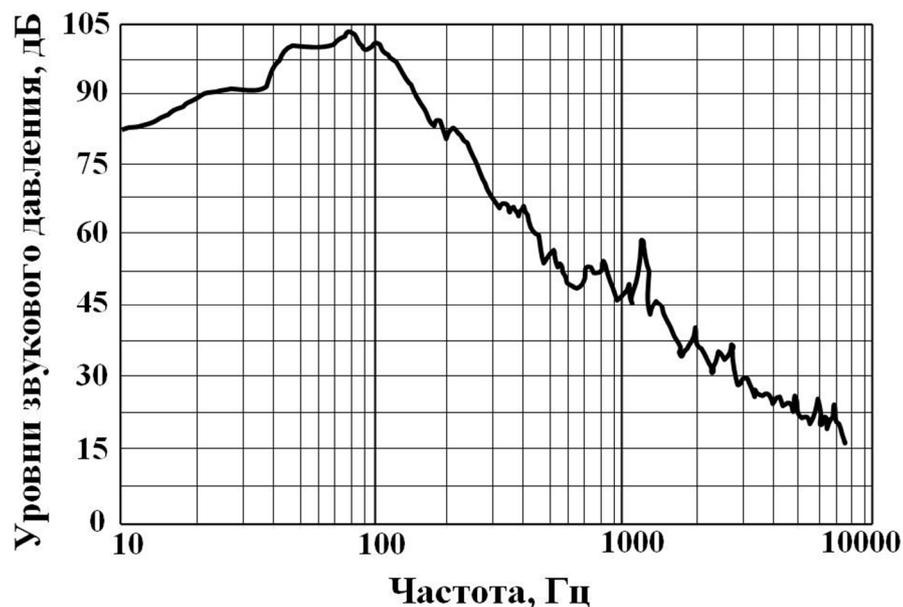


Рисунок 2 - Усредненный спектр шума ДВС

Как видно из рисунка, большая часть мощности сигнала находится в низкочастотной области спектра [91]. Известно, что наибольшее негативное воздействие на организм человека оказывает высокочастотный звук, что находит отражение в существующих требованиях по внутреннему и внешнему шуму машин. Но для акустических сигналов, обладающих выраженным низкочастотным окрасом, свойственно слабое поглощение препятствиями и наличие малых коэффици-

ентов затухания (Таблица 1). В отличие от средне- и высокочастотных шумов, в открытом пространстве они могут свободно распространяться на большие расстояния от источника [17]. Это означает, что наиболее интенсивное воздействие на людей, непосредственно взаимодействующих с МТА, оказывает именно низкочастотный звук.

Таблица 1 - Затухание звука в атмосфере

Октавные полосы частот, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Коэффициент затухания, $\beta_a$	0	0,75	1,5	3,0	6,0	12,0	24,0	48,0

Кроме общего снижения чувствительности слуха повышенные УЗ оказывают влияние на кровеносную, пищеварительную, дыхательную и нервную систему человека, вызывают нарушения сна, изменения дна глазного яблока. Особо высокая интенсивность звука может привести даже к смерти.

При воздействии инфранизкочастотного шума (5-10 Гц) снижается возбудимость клеток коры головного мозга, нарушаются корково-подкорковые взаимоотношения. При высокой интенсивности данного вида шумов появляются ощущения сухости во рту, царапанья в глотке, кашель, удушье, беспокойство и раздражительность. При невысокой интенсивности воздействия инфразвука может развиваться комплекс неприятных ощущений: затруднённое дыхание, боли в животе, чувство подавленности и страха [90, 99].

Многие исследователи для определения влияния низкочастотных акустических полей на организм человека используют резонансные метамоделли для различных внутренних органов. Механизм процесса воздействия на клеточном уровне до конца не изучен, но результаты экспериментов и социально-гигиенических исследований говорят об актуальности применения данных моделей [91].

Как известно, внутренние органы человека имеют собственные резонансные частоты. При совпадении с ними частоты внешних возмущений наблюдаются ре-

зональные явления, характеризующиеся чрезмерным возрастанием амплитуд колебаний органов. Часто этот процесс сопровождается появлением неприятных ощущений по всему телу, головными болями, болями в животе и области сердца. Наиболее опасны случаи длительного воздействия резонансной возбуждающей частоты на наиболее важные внутренние органы человека (Таблица 2) [17, 90].

Таблица 2 - Резонансные частоты органов человека [90]

Органы человека	Собственные резонансные частоты, Гц
Сердце	5-6
Желудок	2-3
Вестибулярный аппарат	0,5-13
Кисти рук	30-40
Глазное яблоко	60-90
Череп	250-300

Кроме механизаторов, неблагоприятному воздействию шума подвергаются люди, непосредственно взаимодействующие с машинами, осуществляющие обслуживание, агрегатирование и ремонтные работы. Следовательно, снижение шума МТА позволяет повысить безопасность труда на всех этапах производства, использующего данные машины.

Кроме показанной выше связи с безопасностью труда борьба с шумом оказывает влияние на показатели экономической эффективности работы предприятий. По данным С. П. Алексеева, под действием длительного систематического интенсивного шума производительность труда на ряде производств снижается до 60 %, а число ошибок, допускаемых в расчетных работах, увеличивается более чем на 50 %. Обеденный перерыв и производственная гимнастика стабилизируют качество работы, однако к концу дня всегда наблюдается наибольшее количество ошибок [5].

Негативное влияние шума на производительность проявляется уже при УЗ 70-72 дБА [118, 128]. По данным Ю. И. Элькина снижение шума на 1 - 2 дБА вызывает прирост производительности приблизительно на 1 % [65, 121]. Согласно исследованиям немецких ученых снижение на 10 дБА уровня шума, воздейству-

ющего на машиниста экскаватора, повышает производительность труда на 7 % [65].

Зависимость производительности труда от среднего уровня шума в течение рабочего дня с некоторой степенью точности можно описать обратной пропорциональной функцией (Рисунок 3). При увеличении уровня шума с 70 до 100 дБ производительность труда снижается на 30 %, что значительно сказывается на рентабельности [5].

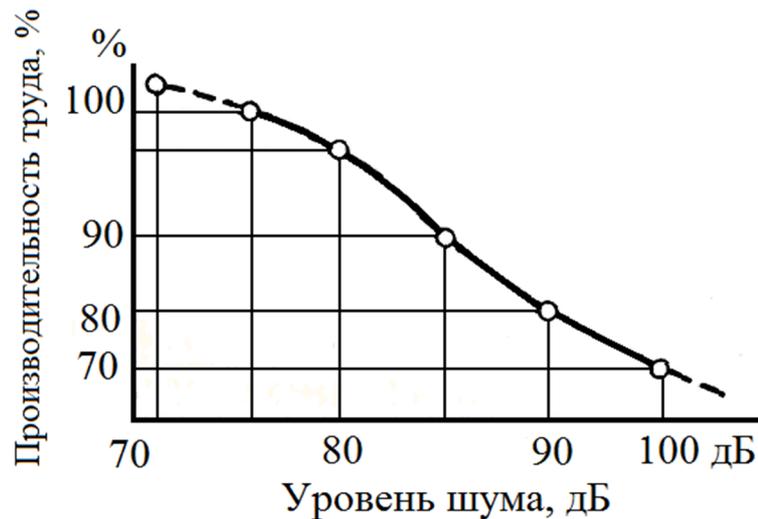


Рисунок 3 - Зависимость производительности труда от уровня шума

Кроме производительности труда, высокие УЗ негативно сказываются на качестве работы трудящихся. Для сельскохозяйственного производства этот факт приобретает особое значение, так как от качества работ, производимых в поле, зависят многие факторы и, в конечном итоге, общая эффективность производства.

Высокая конкуренция на рынке сельскохозяйственных товаров заставляет производителей обращать внимание не только на мощность и стоимость, но и на уровень комфортабельности приобретаемой ими техники, ведь именно в этом показателе скрыт определенный резерв повышения производительности труда. Поэтому снижение уровня шума, генерируемого современной сельскохозяйственной техникой, – задача, которая не скоро утратит актуальность.

Воздействие внешних факторов на организм операторов МЭС приводит к тому, что после 15 лет работы у них наблюдается пик риска формирования профессиональных патологий. В 70 – 80 % случаев этому времени они уже страдают

хроническим общим или профессиональным заболеванием. В результате до 42 % всех выплат пенсий механизаторам производится в связи с инвалидностью. Более половины операторов за 10 - 20 лет до пенсионного возраста оставляют работу тракториста или становятся инвалидами, гибнут в результате несчастных случаев или умирают от полученных заболеваний [21].

Это означает потерю для производства наиболее квалифицированных работников, замену их менее опытными, или вообще простой техники, что снижает производительность машины, каким бы мощным ДВС она не обладала. При этом даже самый квалифицированный работник, испытавший на себе первые признаки профзаболевания, будет уже подстраховываться, избегая излишних перегрузок. Также следует отметить, что лечение, оплачиваемое работодателем, обходится в настоящее время достаточно дорого [15].

На сегодняшний день уровень производства отечественных тракторов и комбайнов для АПК снизился в 16 раз и составляет лишь около 6 % от уровня 1985 г. В связи с этим средний возраст парка тракторной техники составляет около 20 лет. При этом количество тракторов, эксплуатируемых в России, с 1990 г. уменьшилось на 77 % [36]. Износ техники негативно сказывается на состоянии условий труда операторов, особенно по уровням создаваемого шума. Для её дальнейшей эксплуатации необходима разработка новых, более эффективных мер по борьбе с шумом.

Высокие уровни низкочастотных шумов могут повлиять на слуховой контроль функционирования технологического оборудования и своевременное обнаружение неисправностей тракторов и сельскохозяйственных орудий, так как оператор не сможет услышать дребезжание или другой характерный для поломки звук вследствие эффекта маскировки [99]. Он заключается в повышении порога слышимости для акустических сигналов с частотами выше основного тона и меньшей интенсивности (Рисунок 4).

Также шум препятствует использованию средств связи, особенно при работе в поле, где отсутствуют зоны тишины, поэтому для того чтобы разобрать речь

говорящего, приходится заглушать ДВС. Это очень важно, если возникает необходимость оперативного сообщения с оператором.

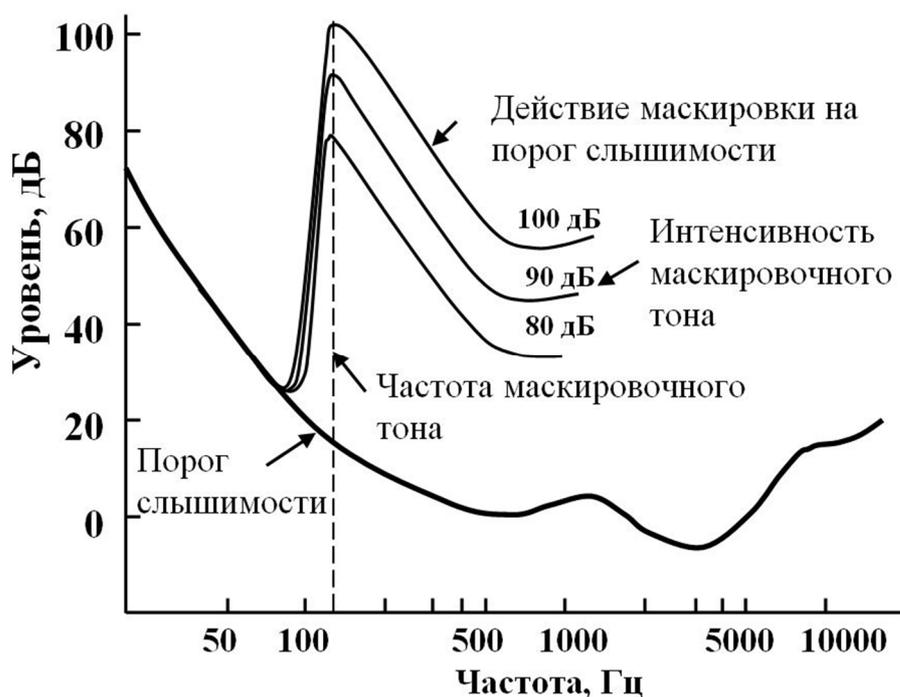


Рисунок 4 - Действие маскировки на порог слышимости

Социальные аспекты борьбы с шумом тракторов в первую очередь заключаются в улучшении условий труда и отдыха, снижении текучести кадров, повышении престижности работы механизатора, проявлении периода активной деятельности работающих, повышении удовлетворенности трудом [122].

В настоящее время профессия тракториста располагается на одном из последних мест по престижности. Основными причинами этого являются самый высокий по стране риск получения профессиональных заболеваний и увечий [118], тяжелые условия труда, низкий социально-культурный уровень коллектива. Как правило, механизаторы редко имеют среднее (еще реже высшее) образование. При этом сложность современной сельскохозяйственной техники неуклонно растет, и для обращения с ней требуются все более подготовленные люди, отсутствие которых приводит к необходимости прохождения имеющимся персоналом различных курсов.

Учитывая предпочтения потребителей и основные свойства российской и импортной техники, выделяются следующие пути повышения конкурентоспособ-

ности отечественных тракторов [108]: повышение качества выпускаемой продукции; расширение линейки продукции за счет внедрения уникальных для российского рынка современных моделей сельскохозяйственной техники; предоставление услуг технического сервиса; освоение новых рынков сбыта.

Для качественного улучшения конкурентоспособности отечественной техники на рынке необходимо оказать положительное воздействие на три типа показателей качества, получивших особый статус: функциональные, ресурсосберегающие и природоохранные (Рисунок 5).



Рисунок 5 - Структура показателей качества тракторов

Три, выделенных на рисунке серым фоном, показателя имеют связь с внешним и внутренним шумом, генерируемым техникой, следовательно, снижение их уровня может оказать значимый вклад в повышение конкурентоспособности разрабатываемой техники.

Показатель «эргономичность» учитывает следующие основные критерии (Рисунок 6): удобство и эффективность управления; эффективность защиты оператора от воздействия факторов производственной среды; удобство обслуживания. С помощью совокупности эргономических показателей оценивают уровень качества машины в результате сравнения ее показателей с показателями базового образца.

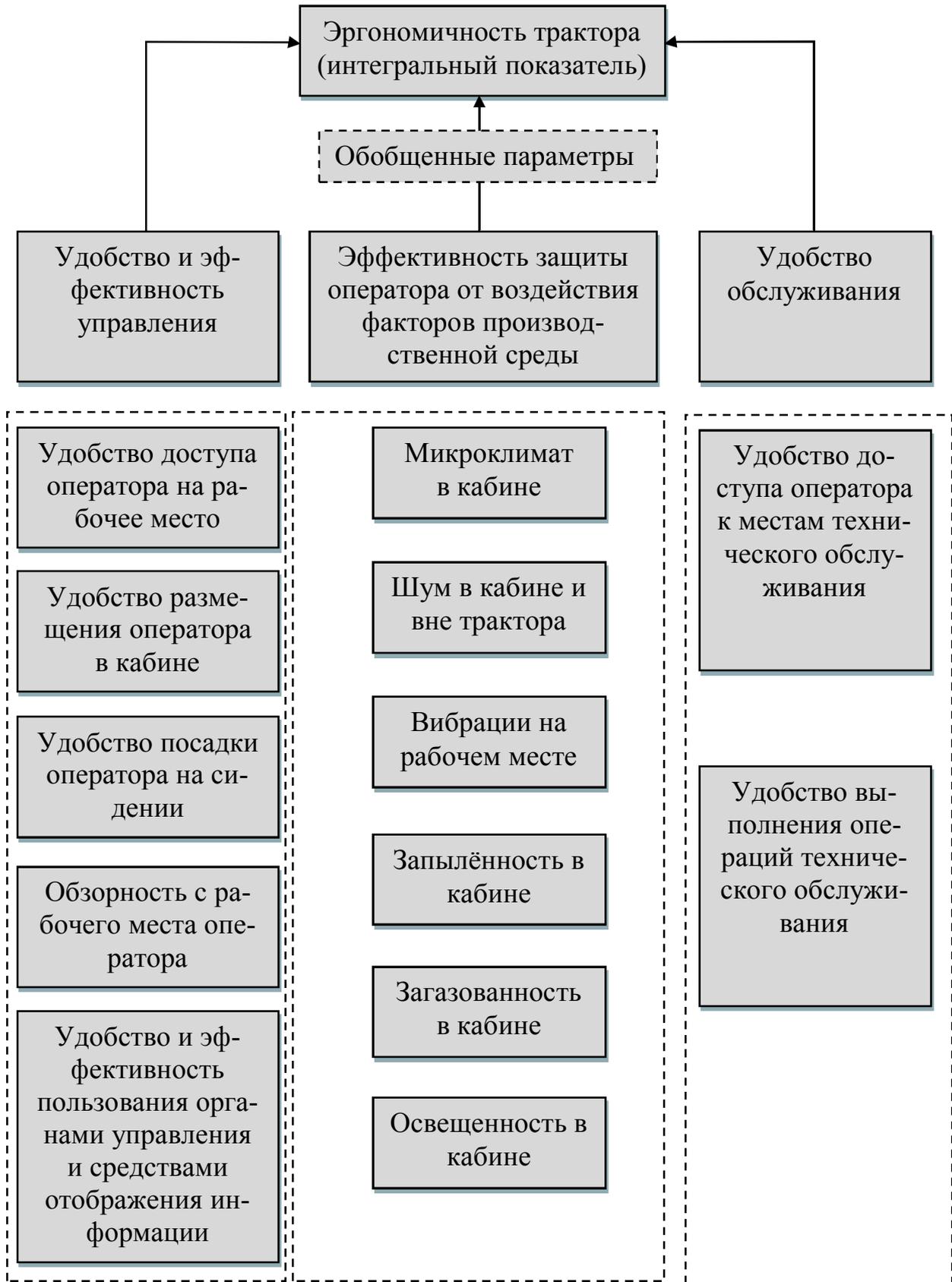


Рисунок 6 - Эргономические показатели тракторов

Интегральный показатель «эргономичность трактора» характеризует уровень его качества [96]. Показатель «экологичность» характеризует степень опасности использования данной техники для окружающей среды и людей.

В последние 30 - 40 лет наблюдается устойчивая тенденция к ужесточению норм по излучаемому машинами шуму [121], и даже если в настоящее время образец техники соответствует установленным в России нормам по уровням излучаемого шума, то это не означает, что в следующем году он также будет выполнять ужесточившиеся нормы.

Как правило, ужесточение норм производится при достижении определенных технических успехов в области борьбы с шумом. В связи с этим в 1989 году Европейские страны приняли директиву 89/392/ЕЭС, касающуюся безопасности машин. В пункте 1.5.8 приложения 1 указано, что машина должна быть сконструирована и изготовлена так, чтобы опасность, вызываемая излучением шума, была доведена до минимума с учетом технического прогресса в этой области и наличия средств для снижения шума, особенно в его источнике. С целью поощрения дальнейших исследований по снижению шума машин Федеральное министерство по охране окружающей среды Германии в 1998 г. объявило о начале выдачи специальной награды «Голубой ангел». Данную награду получают производители техники, уровни шума которой на 5 - 14 дБА (в среднем на 10 дБА) ниже предельных значений, установленных нормами Европейского союза [112].

Из вышесказанного можно сделать вывод, что снижение уровней излучаемого МТА шума – это один из способов повышения конкурентоспособности продукции отечественных производителей на мировом рынке. Производителям техники необходимо уделять этому вопросу должное внимание.

### **1.3 Характеристика основных источников шума машинно-тракторных агрегатов**

Образуемое МТА звуковое поле имеет достаточно сложный характер, поэтому, чтобы его описать, необходимо проанализировать причины и основные источники возникновения шума.

Причинами возникновения шума являются:

- взаимодействие колеблющегося тела с упругой средой (воздухом);
- «мгновенное» выделение энергии в конечном объеме среды;
- подведение конечного объема вещества в область упругой среды;
- взаимодействие потока вещества с твердым телом.

Общий шум агрегата складывается из двух составляющих (Рисунок 7):

**I** – шум, излучаемый трактором; **II** – шум, излучаемый орудием.

УЗ, генерируемые орудиями различного назначения, зависят от наличия у них активных органов, использующих энергию трактора.

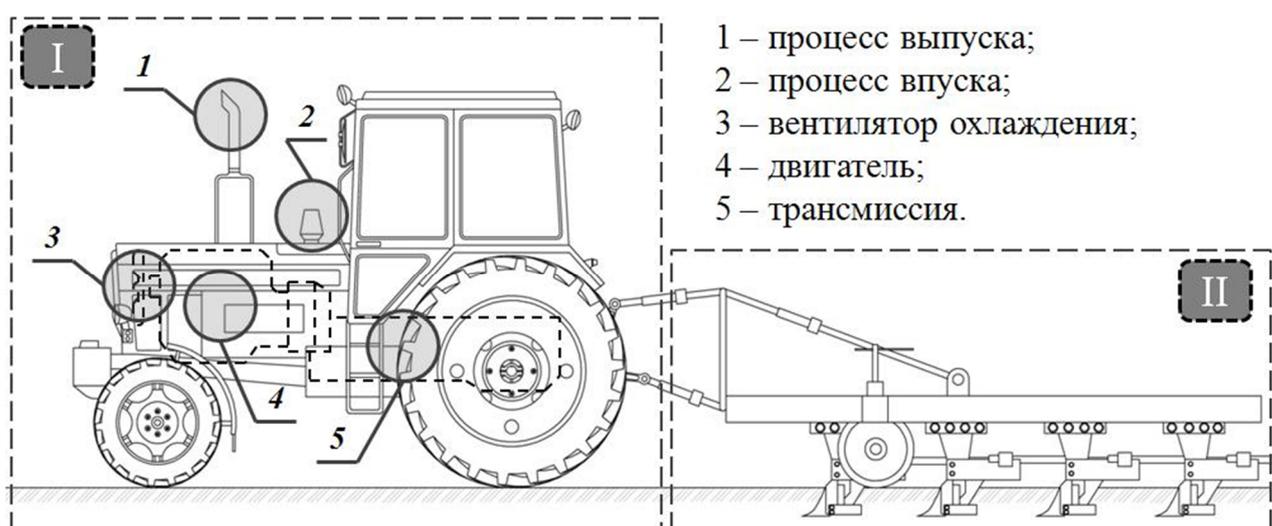


Рисунок 7 - Основные источники шума МТА

Шумы, образуемые в процессе эксплуатации СХМ можно разделить на:

- возникающие при взаимодействии рабочих органов орудий с обрабатываемым материалом и воздушной средой;
- возникающие в приводных механизмах орудий при различных соударениях, пересопряжениях в зубчатых передачах и т.д.;
- возникающие при обтекании воздухом лопастей вентилятора;

Уровни звука, создаваемые большинством орудий незначительны по сравнению с уровнями, генерируемыми трактором. Они полностью маскируются за шумом источников, расположенных на тяговой машине. Обратная ситуация возможна только в случае, если у орудия имеется автономный источник энергии, как например у газоструйной снегоочистительной машины [113]. Необходимо учиты-

вать, что таких машин немного и используются они очень редко. Следовательно, главные источники шума, создаваемого МТА, расположены на тракторе.

Основные источники шума тракторов, представленные на рисунке 7 [11, 101]: процесс выпуска; процесс впуска; вентилятор системы охлаждения; двигатель; трансмиссия.

Первые три источника генерируют аэродинамический шум, последние два – механический. Анализ литературных источников по борьбе с шумом ДВС показывает, что у авторов нет единого мнения по поводу того, какой из источников доминирует.

Определенная часть авторов признает наиболее значимым вклад шума, излучаемого ДВС [1, 59, 83, 100], и распространяемого структурного шума. По данным В. С. Руссинковского [85], структурный шум корпуса двигателя формирует до 33 % общего звукового поля автотракторной техники (Рисунок 8).

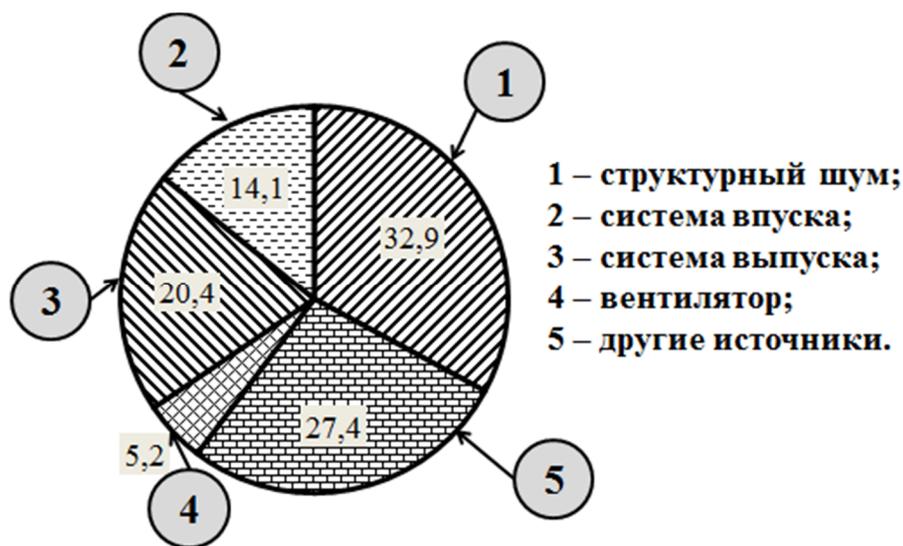


Рисунок 8 – Структура основных источников шума автомобиля с дизельным двигателем по [85]

Данный вид шумов возникает в основном из-за деформации стенок камеры сгорания в процессе сжатия, сгорания или расширения, приводящей к колебаниям наружных стенок ДВС. Кроме того, образуемые в процессе сгорания и при переключках поршней о цилиндры газовые и механические удары возбуждают в ДВС механические колебания на многочисленных резонансных частотах его деталей. Также на общее акустическое поле МЭС оказывает влияние опрокидывающий

момент ДВС, приводящий к распространению по конструкции вибраций и возникновению структурного шума [59].

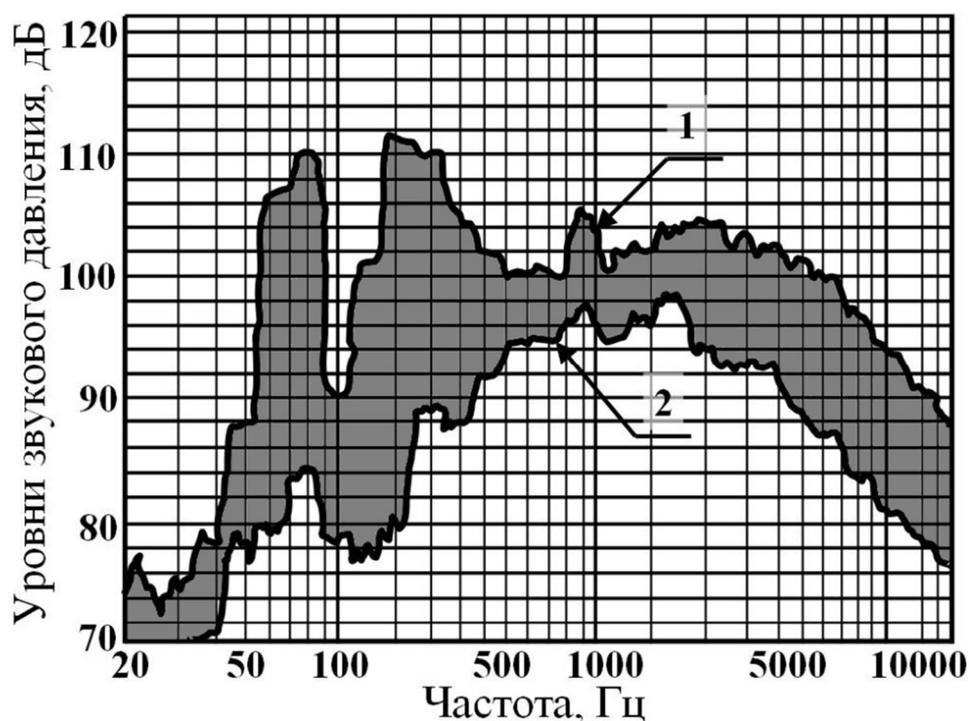
Многие авторы считают наиболее значимой борьбу с шумом, генерируемым при всасывании свежего заряда [60, 95, 109]. В монографии Кане А.Б. [46] сказано, что в автотракторных двигателях мгновенные значения уровня звукового давления (УЗД) при осуществлении процесса наполнения достигают 115 – 120 дБ [61]. Основными составляющими акустического излучения процесса впуска являются [65]:

- шум от воздействия поршня на массы газа и смеси во впускном тракте;
- вихревые шумы, обусловленные обтеканием различных элементов тракта;
- шумы, возникающие при трении потока о стенки каналов, камер и т.д.

Большинство исследователей сходятся во мнении, что при отсутствии или установке неэффективных глушителей шум, создаваемый в процессе выпуска ОГ, будет определять акустическое поле трактора во всем диапазоне звуковых частот [37, 40, 49, 67, 80, 113, 119] (Рисунок 9).

По мнению М. А. Разумовского, исключение шумов процессов впуска и выпуска (Рисунок 9, линия 2), при отводе ОГ и воздуха через трубы практически полностью решает задачу уменьшения низко- и среднечастотного шума ДВС. Уровень внешнего шума трактора при снятом глушителе шума выпуска (Рисунок 9, линия 1) значительно превышает внешний шум при исключении аэродинамических источников, особенно в низкочастотном диапазоне. Максимальная необходимая эффективность глушителя шума для данного трактора равна разнице между линией 1 и линией 2. Область на рисунке, окрашенная серым цветом характеризует данную эффективность.

В настоящее время источники шума тракторов и автомобилей изучены широким кругом авторов, однако отсутствует четкая методика доводки данных источников до нужного уровня излучения [100]. Одной из причин данного факта является то, что на различных типах тракторов и автомобилей применяются разные марки двигателей, которые могут значительно отличаться акустическими характеристиками.



1 – без глушителя шума процесса выпуска и воздушного фильтра; 2 – выпуск и впуск через трубы, выведенные из акустической зоны измерения шума трактора.

Рисунок 9 – Спектрограмма шума дизеля Д-240

При этом используется множество типов глушителей шума впуска и выпуска, звукоизолирующих кабин, поглощающих облицовок и т.д., также обладающих различной эффективностью. Все это делает невозможным выявление наиболее значимого источника для большой группы машин и затрудняет выбор для них наиболее рациональных мероприятий по снижению шума. Этим также можно объяснить разногласия авторов.

Согласно маркетинговым исследованиям в Российской Федерации наибольшее распространение получили тракторы тягового класса 1,4 и 2,0. Около 95% из всех приобретаемых на сегодняшний день тракторов этих классов производится ПО «Минский тракторный завод». Это объединение поставляет в Россию более 57% от новой тракторной техники, закупаемой страной. При этом на мировом рынке тракторов ПО «Минский тракторный завод» занимает также значимую часть – около 10% [38, 120]. Известнейшей маркой этого бренда является «Беларус-1221». Он используется практически во всех аграрных предприятиях страны и может применяться для многих агрономических и транспортных операций.

Согласно исследованиям, проведенным М.А. Разумовским [80], для марки тракторов Беларусь – 82 в структуре источников шума по развиваемым УЗД первое место занимает шум процесса выхлопа (Рисунок 10).

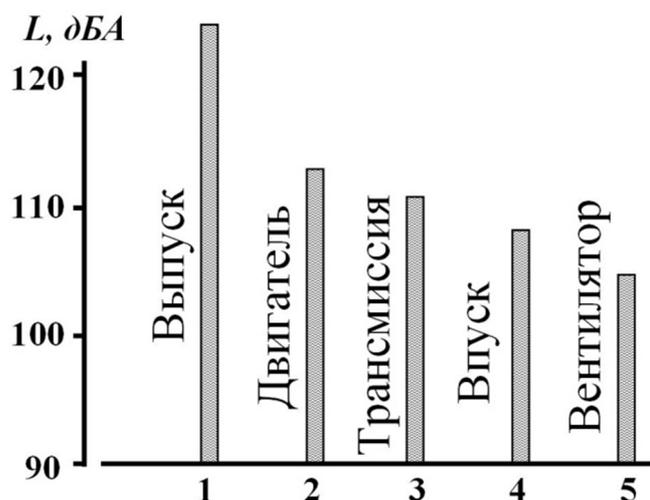


Рисунок 10 – Уровни звукового давления, развиваемые основными источниками шума трактора «Беларус – 82»

Таким образом, выпускная система данной марки трактора является источником наиболее интенсивного шума и определяет общий уровень шума МТА. В монографии Разумовского М.А. [80] даётся последовательное и структурное описание характеристик всех основных источников шума тракторов и способов их снижения. К недостаткам данной работы следует отнести отсутствие упоминаний об интенсивно развивающемся за рубежом активном способе снижения звуковых полей [126].

#### 1.4 Способы снижения шума процесса выпуска

Несмотря на сложность процессов формирования звука при выпуске ОГ, работы над уменьшением шума выпуска ведутся в течение всего периода производства ДВС [23]. В настоящее время имеется множество конструктивных решений, позволяющих снизить шум выпуска, большинство из которых можно объединить в следующие два направления:

- 1) уменьшение шумообразования в процессе выпуска;
- 2) уменьшение шума, излучаемого выпускной системой.

Уменьшение шумообразования в источнике достигается в основном за счет усовершенствования газораспределительного механизма ДВС. Одним из таких решений, предложенным Д. Беннетом, является применение в выпускном канале 2 клапанов с разными фазами открытия. Один из клапанов открывается раньше и выходящая из него струя газов дросселирует выпуск из второго клапана, уменьшая тем самым уровень шума выпуска [107].

Более перспективным решением, предложенным Л. С. Гильманом [23], является оптимизация формы выпускного тракта в зоне седла и клапана двигателя, направленная на уменьшение скорости истечения газов в полость выпускного канала. Суть решения заключается в спрофилированном соответствующим образом выпускном клапане и начальном участке канала. Эффективностью применения данного решения является снижение шума на  $\sim 2$  дБ в диапазоне частот до 500 Гц [23].

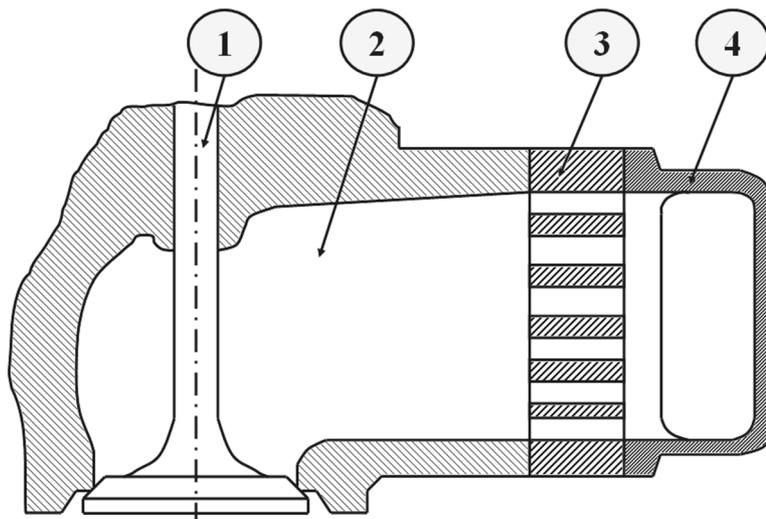
Другим видом исследований по этому направлению является оптимизация формы кулачков распределительного вала, определяющей закон движения клапанов по углу поворота коленчатого вала с целью снижения скорости рабочего тела в проходных сечениях. По данным В. С. Макаревича [62] результатом является снижение уровня шума на 2 дБ при 1200 об/мин и на 4 дБ при 3000 об/мин.

Интересный способ снижения общего уровня шума, генерируемого процессом выпуска, за счет устранения вихревых шумов предлагается В. С. Седач [89]. Достигается это путем оптимизации формы внутренней полости выпускного коллектора, при которой будут отсутствовать срывы потока газов. К положительным эффектам также следует отнести некоторое снижение противодавления выпускной системы, что уменьшает потери мощности ДВС, затрачиваемые на эвакуацию выхлопных газов.

К общим недостаткам для всех четырех предложенных способов следует отнести низкую эффективность и отсутствие возможности простого предварительного расчета необходимых параметров при проектировании.

Ко второму направлению борьбы с шумом процесса выпуска относят использование глушителей, применение выпускных коллекторов с разной длиной

рукавов, использование высокочастотных глушителей в каждом цилиндре (Рисунок 11) и др. [11, 23, 37, 40, 49, 52, 59, 95, 101].



1 – выпускной клапан; 2 – канал; 3 – соединительные трубки; 4 – коллектор

Рисунок 11 – Выпускная система с акустическим сопротивлением на выходе из канала

Наиболее эффективным способом снижения шума выпуска до сих пор остается применение различного рода глушителей. Результаты исследований снижения шумообразования в источнике в настоящее время не позволяют создать ДВС, не нуждающийся в глушителе. В то же время для двигателя с уменьшенным шумообразованием снижается и необходимая эффективность глушителя, поэтому даже частичные результаты в этом направлении могут быть полезны.

Глушитель – это устройство, служащее для преобразования энергии, устанавливаемое в конце газовыпускного тракта с целью снижения шума [37].

Глушители должны снижать шум, образуемый в основном двумя процессами [43]:

- Первый процесс связан со звуком, который возникает вне пределов глушителя и передается на него через трубопроводы. Снижение этого шума глушителем основано на таких акустических принципах, как отражение, поглощение или интерференция звука.
- Другой процесс — образование аэродинамического шума на срезе выпускного устройства при прохождении потока сжатого воздуха или ОГ. Ослаб-

ление аэродинамического шума здесь достигается путем воздействия на поток, проходящий через глушитель, и снижения его энергии.

Для уменьшения энергии потоков или струй используется следующее:

- изменение движения газового потока или струи путем внезапного расширения или сжатия проходного сечения, поворота, удлинения пути и т.п.;
- совершение потоком (струей) работы;
- охлаждение газового потока;
- введение добавочного сопротивления при движении потока или струи.

С этой целью в глушителях применяются расширительные камеры, перфорированные трубки и перегородки, глухие перегородки, трубки Вентури, перфорированные обечайки и др.

Результат обобщения классификаций глушителей, представленных в различных литературных источниках [5, 37, 43, 61, 95, 122], показан ниже (Рисунок 12).

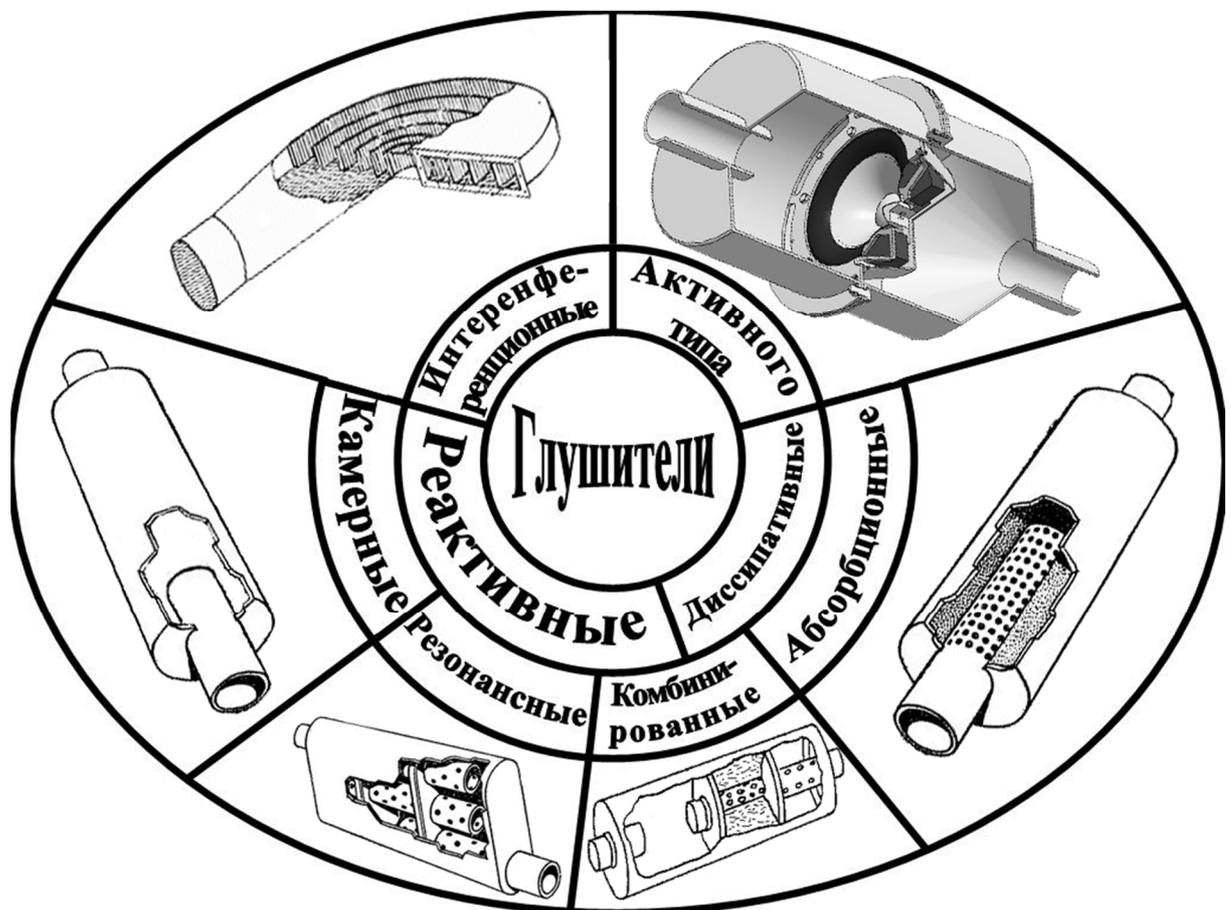


Рисунок 12 – Классификация глушителей шума процесса выпуска

Камерные глушители действуют как акустические фильтры, снижая звук на некоторых частотах за счет его отражения в местах сужения и расширения воздухопровода [119]. Данный вид глушителей наиболее эффективен на низких частотах, а их акустическая характеристика может иметь широкие полосы заглушения и узкие полосы полного прохождения звука.

Резонансные глушители представляют собой газовые полости, сообщающиеся с трубопроводом при помощи отверстия. Эти глушители обычно оформляются в виде группы резонаторов, они применяются для подавления дискретных составляющих шума. Каждый резонатор является элементарной колебательной системой с затуханием, которая будучи возбуждена падающей на неё звуковой волной, отбирает от последней акустическую энергию на частотах, близких к собственной частоте [5].

В абсорбционных глушителях снижение шума достигается за счёт перехода звуковой энергии в тепловую в звукопоглощающем элементе. Глушители эффективны в средне- и высокочастотном диапазонах с максимумом на частотах, при которых коэффициент звукопоглощения материала близок к единице [43].

Интерференционные глушители для снижения шума используют взаимное ослабление звуковых волн, прошедших через каналы разной длины и находящихся, вследствие этого, в противофазе. Применение глушителей данного типа, так же как и резонансных, наиболее эффективно, когда требуется заглушить одну или несколько тональных составляющих в стабильном спектре шума.

Комбинированные глушители объединяют в себе несколько принципов снижения шума и могут иметь признаки всех вышеперечисленных типов глушителей. Их эффективность складывается из эффективностей входящих в состав стандартных типов глушителей (основанных на одном принципе снижения шума).

Все вышеназванные типы глушителей являются пассивными, так как не используют для снижения шума внешних источников энергии.

В настоящее время накоплен достаточно большой опыт в проектировании и предварительном расчете результативности пассивных глушителей шума. Данному вопросу посвящено большое количество научных работ и публикаций. Методы

расчета эффективности данного типа глушителей в различных исполнениях и комбинациях подробно рассмотрены в трудах Б. К. Шапиро [114], Р. Н. Старобинского [98], А. И. Комкина [50, 51, 52, 53], И. И. Клюкина [50], А. В. Васильева [17], Л. С. Гильмана [23], Д. В. Баженова [9] и других авторов [5, 7, 11, 13, 40, 122]. Практическому исследованию эффективности различного рода глушителей шума пассивного типа также посвящено большое количество работ, к наиболее значимым из которых следует отнести труды Н. И. Иванова [42, 43, 44], В. Н. Луканина [59, 60, 61], М. А. Разумовского [80, 81], М. Н. Дробаха [37] и других авторов [12, 80, 101, 121].

ГШАТ используют для борьбы с шумом САШ. Они основываются на принципе интерференции: наложении звуковых волн с одинаковыми амплитудами и противоположными фазами с их взаимным гашением. ГШАТ обладают наибольшей эффективностью в низкочастотном диапазоне, и в отличие от других не требуют для этого больших габаритов и дорогостоящих материалов. Многие исследователи признают большую перспективность применения данного типа глушителей [17, 37, 43, 59, 65, 91, 122].

Так как у современных автомобилей практически не заметен шум выхлопа, распространенным является мнение о том, что при установке схожих систем глушения на трактор будет наблюдаться такой же эффект. Следует помнить, что большинство современных тракторов, в отличие от автомобилей, оснащены дизельными двигателями, а они характеризуются более жесткой работой и более высокими давлениями в цилиндрах. При этом средняя мощность и литраж тракторных ДВС намного выше большинства автомобильных. Это определяет более значительные амплитуды пульсаций объемного расхода газов в выхлопной системе, а следовательно, и более высокий общий уровень шума.

Также следует учитывать тот факт, что длина выпускного тракта автомобилей и тракторов весьма различается. Вследствие предъявляемых к тракторным глушителям требований по пожарной безопасности, они располагаются непосредственно за коллектором, вблизи кабины оператора, что определяет значимость данного источника при формировании звукового поля внутри трактора. А для ав-

томобилей характерны весьма протяженные (до 6 м) выпускные тракты, которые позволяют перед глушителем установить катализатор, обладающий также значительным эффектом при глушении шума. При этом выпуск ОГ происходит обычно в задней части автомобиля, на наибольшем расстоянии от водителя.

### **1.5 Основы применения систем активного шумоподавления в глушителях шума процесса выпуска**

Термин «активное шумоподавление» впервые был введен в патенте Пола Луега, полученном им в 1936 г. В связи с недостаточной развитостью транзисторной техники и электроники устройство, предложенное в патенте, не могло в то время быть практически реализовано. На сегодняшний день благодаря быстрым темпам развития сигнальных процессоров различных фирм (Analog Devises, Motorola, Texas Instruments), а также детальной проработке теоретических основ активного снижения звуковых полей, САШ находят всё большее применение в различных областях деятельности людей. Эффективность применения таких систем при глушении тонального шума может достигать ~50 дБ [65].

Большой вклад в разработку теоретических и прикладных основ применения САШ внесли отечественные ученые Г. Д. Малюжинец, Б. Д. Тартаковский, Е. М. Бабасова, А. В. Васильев, С. Г. Семенцов, А. И. Власов, А. И. Комкин, А. В. Мокринский и др.

Работа простейшей САШ с прямой связью заключается в следующем (Рисунок 13). Входной микрофон, установленный в акустическом канале на пути распространения исходного шума, обнаруживает шум и подает пропорциональный входной сигнал блоку управления (БУ), который его обрабатывает согласно заложенному алгоритму и формирует сигнал управления. При его формировании БУ также используется сигнал, получаемый с выходного микрофона, расположенного в зоне за источником антизвука (ИАЗ). Сигнал управления подается в ИАЗ, который формирует дополнительную звуковую волну в канале. Алгоритм, заложенный в БУ, должен подстраивать параметры сигнала управления таким образом, чтобы интерференция между исходным шумом и произведенной ИАЗ вол-

ной была максимальной [8, 17]. Теоретически, если БУ справляется с этой задачей, то за ИАЗ может образоваться зона тишины. При этом сигнал с выходного микрофона становится минимальным, и БУ, основываясь на этом сигнале, фиксирует свои параметры подстройки.

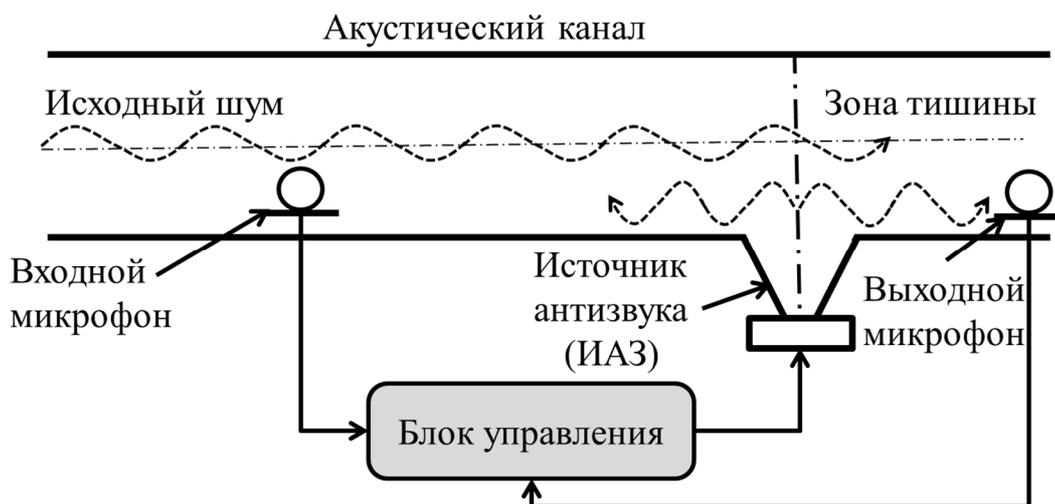


Рисунок 13 – Система Пола Луэга

Как показывают исследования, такая система позволяет эффективно снижать уровни шума при распространении плоских волн по каналам в диапазоне частот до 500 Гц [126, 129]. Этот факт обуславливает перспективность применения подобных систем для снижения шума тракторов сельскохозяйственного назначения, так как он имеет выраженный низкочастотный характер.

В настоящее время разработано и исследовано большое количество различных исполнений САШ, которые можно классифицировать по многим признакам. Наиболее полная классификация данных систем и патентный обзор по алгоритмам представлены в работе А.В. Васильева [17]. Также в его работе предпринята попытка расчета эффективности ГШАТ процесса впуска свежего заряда, рассмотрены сложности и недостатки, возникающие при работе подобных систем. Основным недостатком данной работы является использование неадаптивных САШ. Это означает, что в блок управления должны быть предварительно заложены характеристики работы САШ для данного ДВС, обеспечивающие максимальную эффективность шумоподавления. При этом не учитываются постепенное изменение

шумовых параметров двигателей в процессе эксплуатации и износа, а также общие индивидуальные различия при работе ДВС одной марки.

В диссертации С. Г. Семенцова [90, 91] детально рассмотрены физические основы применения САШ. Кроме этого, описаны базовые принципы расчета САШ с использованием аналитического, трассерного, реверберационного и конечно-элементного подходов. Также подробно изложены принципы реализации наиболее применяемых адаптивных алгоритмов. Более полное описание данных алгоритмов изложено в классической книге Коуэна и Гранта [3], труде В. Н. Джигана [33], учебнике А. Б. Сергиенко [92] и книге Элиотта [125], и др. [47, 127].

К недостаткам работы С. Г. Семенцова можно отнести недостаточность описания практической реализации предлагаемой системы и то, что в приложении приводится ассемблерный листинг алгоритма, написанный для модуля EZ-Kit Lite Shark ADSP-21061, который невозможно напрямую использовать для процессоров других производителей. Кроме того, в диссертации не представлено примера практического расчета передаточных функций вторичных путей ни для одного из предложенных методов.

К наиболее качественным и содержательным трудам по методике расчета результативности применения глушителей шума относится диссертация А. И. Комкина [52]. В данной работе систематизирован и проработан передовой опыт отечественных и зарубежных ученых по расчету эффективности пассивных глушителей шума. К сожалению, в данной работе также не предложено методики определения эффективности при использовании в конструкции глушителя САШ.

Во многих работах, посвященных практическому исследованию эффективности глушителей шума различных конструкций глушители с САШ даже не рассматриваются. К ним относятся диссертация М. Н. Дробаха [37], учебник Н. И. Иванова [43] и др. труды [59, 80, 101, 128, 129].

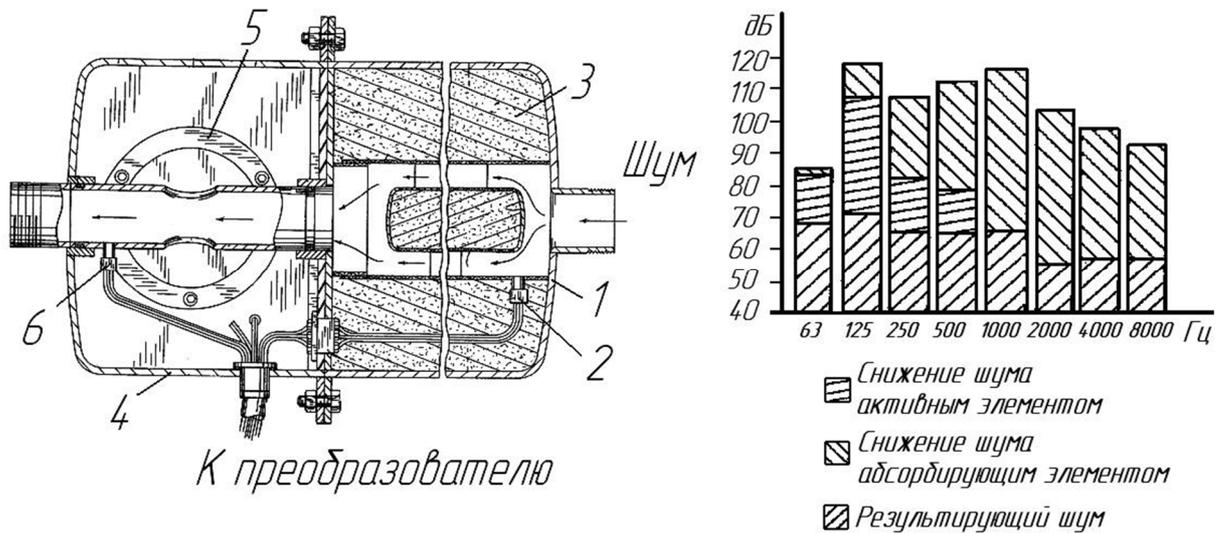
Исследованию теоретически достижимой активной компенсации звуковых полей посвящено достаточно большое количество научных работ и публикаций [8, 53, 77, 78]. Общий недостаток для всех указанных трудов – использование излучателей и приемников с идеальными характеристиками, кроме этого, в работах

не учтены эффекты дискретизации по времени и квантования по амплитуде всех применяемых блоком управления сигналов, вследствие конечной разрядности применяемых АЦП и ЦАП.

В настоящее время существует множество конструкций ГШАТ. Рассмотрим наиболее интересные из них.

Весьма эффективен комбинированный абсорбционно-камерный глушитель, использующий САШ (Рисунок 14) [88]. Корпус глушителя состоит из фронтальной 1 и тыловой 4 частей, что обеспечивает его разборность и удобство доступа к активным органам для технического обслуживания и ремонта.

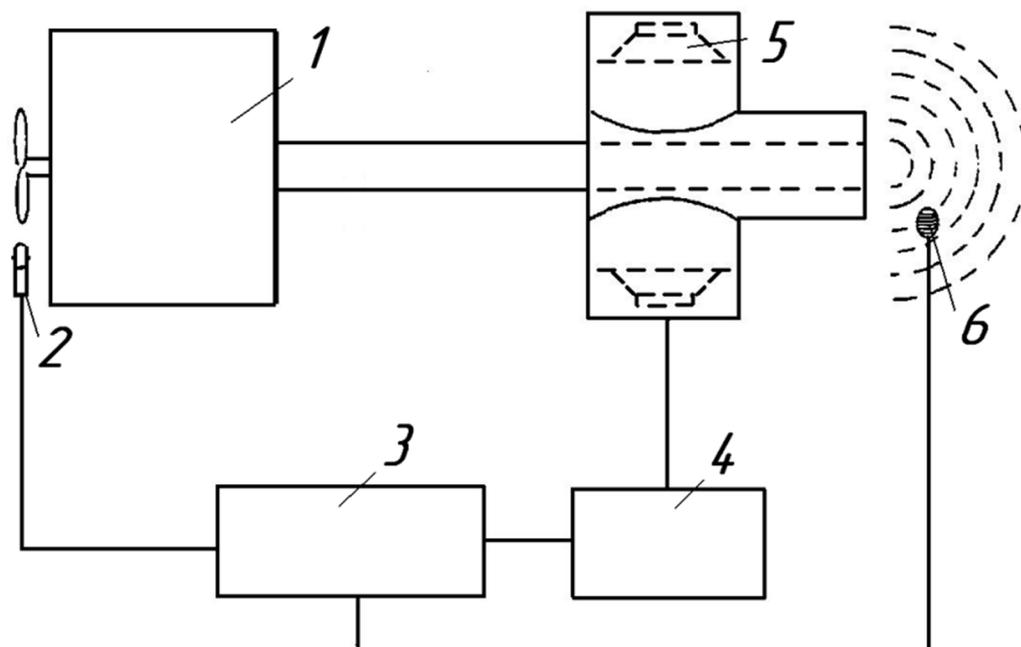
Работа глушителя основана на улавливании шума выхлопа входным датчиком 2, последующей обработке данного сигнала в цифровом преобразователе, подаче его в громкоговоритель 5 и интерференции исходного и полученного звуковых сигналов с их взаимным аннулированием. Как видно из результативности применения данного глушителя, активный элемент наиболее эффективен на частоте первой гармоники, а абсорбирующий - в высокочастотном диапазоне.



1 – фронтальная часть корпуса; 2 – входной датчик (микрофон); 3 – абсорбирующий материал; 4 – тыловая часть корпуса; 5 – громкоговоритель;  
6 – датчик ошибки.

Рисунок 14 – ГШАТ и эффективность его применения

На рисунке 15 показано схематическое изображение более реалистичного решения с защитой динамиков от воздействия потока выхлопных газов.



1 – двигатель; 2- датчик синхронизации (тахометр); 3 – контроллер; 4 – усилитель;  
5 – акустическая система; 6 – датчик остаточного звука.

Рисунок 15 – Схема активной цифровой системы глушителя

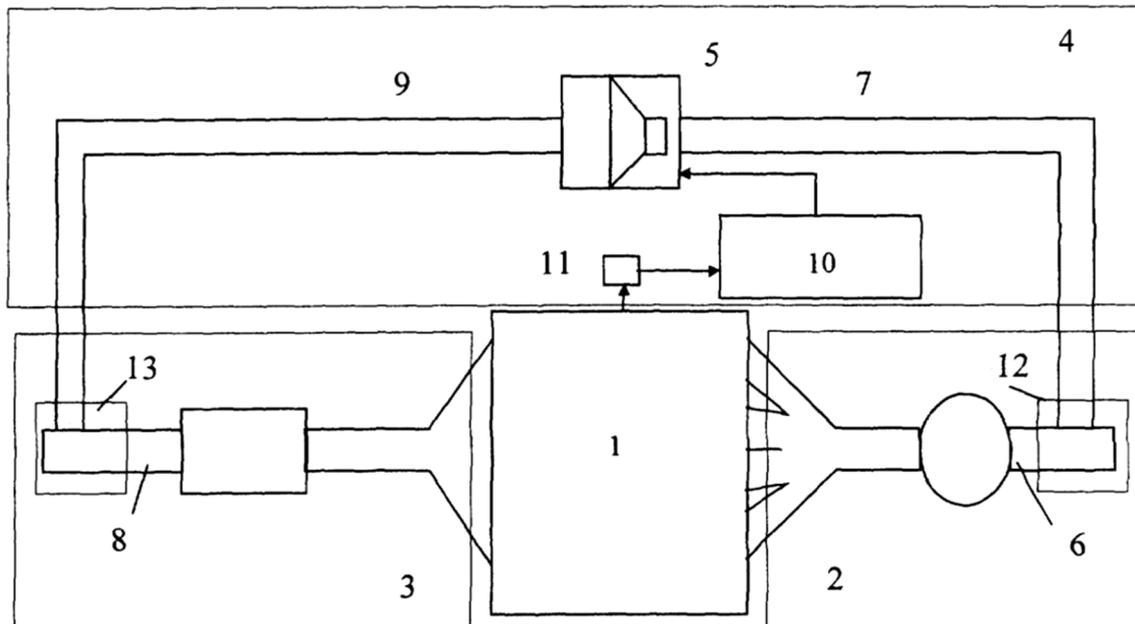
Датчик синхронизации, такой как тахометр двигателя, образует входные синхросигналы для контроллера, который также получает сигналы микрофона датчика остаточного звука. Контроллер генерирует синусоидальные сигналы с частотой, соответствующей синхросигналам, обрабатывает их через адаптивный фильтр с конечной импульсной характеристикой, а также регулирует коэффициент усиления усилителя мощности. Усилитель возбуждает акустические системы в камере для генерирования подавляющих шум акустических колебаний, которые затем перемещаются к плоскости выходного отверстия выхлопной трубы и производят гашение звуковых колебаний, выходящих из отверстия трубы. Достоинством данной системы является отсутствие возможности возникновения обратной связи между динамиком и входным датчиком [125].

Приведенные в таблице 3 данные об эффективности применения глушителя шума активного типа свидетельствуют о значительном снижении уровней шума при использовании САШ [94]. Например, шум процесса выпуска в точке 0, соответствующей частоте 90 Гц, при включении САШ глушителя снижается на 26 дБ, а в точке 2, соответствующей частоте 120 Гц, – на 7,5 дБ.

Таблица 3 – Эффективность применения САШ в глушителе

Точка	Частота, соответствующая пику на спектрограмме, Гц	Звуковое давление при отключенной системе, дБ	Звуковое давление при включенной системе, дБ
0	90,00	72	45,5
1	104,99	44,7	38,2
2	120,00	44,1	36,6
3	135,00	48,2	30,3
4	150,00	51,7	29,7
5	165,00	44,1	34
6	180,00	65,2	40,6
7	240,00	53,9	31,8
8	270,00	49,2	31,8
9	360,00	43,9	37,8

Некоторыми авторами разрабатываются патенты, реализующие одновременное активное подавление шумов процессов выпуска и впуска, как например система, предложенная А.В. Васильевым и А.В. Мокринским [93] (Рисунок 16).



1 – двигатель; 2- система впуска; 3 – система выпуска; 4 – система формирования компенсирующего сигнала; 5 – источник звука; 6 – впускной патрубок; 7, 9 – волноводы; 8 – выхлопная труба; 10 – блок управления; 11 – датчик частоты; 12, 13 – зоны компенсации.

Рисунок 16 – САШ впуска и выхлопа

Одновременное поглощение возможно благодаря тому, что процессы впуска и выпуска создают шум в противофазе, а динамик, использующийся для создания антизвука, также генерирует акустическое излучение с обратной стороны.

В высоко- и среднечастотном диапазоне спектра шума эффект шумоглушения достигается в основном при помощи камеры воздухоочистителя на впуске и глушителя шума на выхлопе. В низкочастотном диапазоне для эффективного снижения шума используется САШ.

## 1.6 Выводы

1. Современный вектор развития тракторной техники, направленный на постоянный рост энергонасыщенностей и скоростей движения, оказывает негативное влияние на комфортабельность, виброакустическую и информационную нагруженность рабочего места тракториста, что принуждает производителей вкладывать больше средств на поддержание комфорта тракторов. Исследованиям шума автотракторной техники посвящено большое количество работ, однако положительные и отрицательные стороны использования САШ для снижения шума автотракторных средств изучены недостаточно.

2. Анализ литературных источников показал, что большинством авторов в качестве основного источника, определяющего мощность и спектральный состав звуковых полей МТА, признается аэродинамический шум ОГ ДВС. При полном исключении шума, создаваемого выпуском ОГ, вероятность превышения предельных УЗ практически сводится к нулю. При этом выявлено, что наибольшая мощность шума данного источника сосредоточена в инфра- и низкочастотном диапазоне спектра.

3. В силу специфических условий работы тракторов их выпускная система имеет весьма незначительную длину, а срез выпускного патрубка глушителя располагается в непосредственной близости к стенкам кабины, что обуславливает особые требования к его эффективности. Практически все современные тракторы оснащаются пассивными глушителями, эффективность которых в низкочастотном

диапазоне незначительна, из-за ограничений в габаритных размерах, массе и стоимости.

4. Многочисленные исследования показали, что высокой эффективностью при снижении инфра- и низкочастотных шумов обладают САШ. Количество работ, посвященных этим системам, постоянно увеличивается, но при этом вопрос эффективности использования их в глушителях шума тракторов не проработан.

5. Наибольшее влияние на эффективность работы САШ оказывает правильный подбор параметров адаптивного алгоритма, реализуемого блоком управления. Проблеме рационального подбора подобных параметров для использования в различных условиях в настоящее время не уделено должного внимания.

6. В настоящее время вопрос определения эффективности пассивных глушителей является широко исследованным. При этом не существует общей методики определения эффективности глушителя шума, обладающего как пассивными, так и активными компонентами. Этот вопрос требует более глубокого изучения.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АКТИВНОГО СНИЖЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ

### 2.1 Разработка методики определения эффективности глушителей шума активного типа

В настоящее время разработан достаточно сложный математический аппарат [11, 23, 50, 52, 80, 98], позволяющий с приемлемой точностью получать характеристики пассивных глушителей шума. При этом не существует методик, позволяющих построить адекватную модель глушителя шума, использующего САШ.

Дело в том, что разработанные методики предусматривают рассмотрение характеристик глушителей лишь в частотной области, в то время как эффективность САШ зависит от временных характеристик исходного шумового сигнала. Поэтому при определении эффективности ГШАТ, необходимо разрабатывать математическую модель, оперирующую как в частотной, так и во временной областях.

Рассмотрим алгоритм вычисления эффективности глушителя шума с одним фронтальным динамиком и двумя реактивными камерами (Рисунок 17).

Для того чтобы снизить громоздкость вычислений, введем некоторые ограничения в разрабатываемую математическую модель:

1. Рассмотрение акустических характеристик глушителя производим только в диапазоне звуковых частот от 20 Гц до 20 кГц.

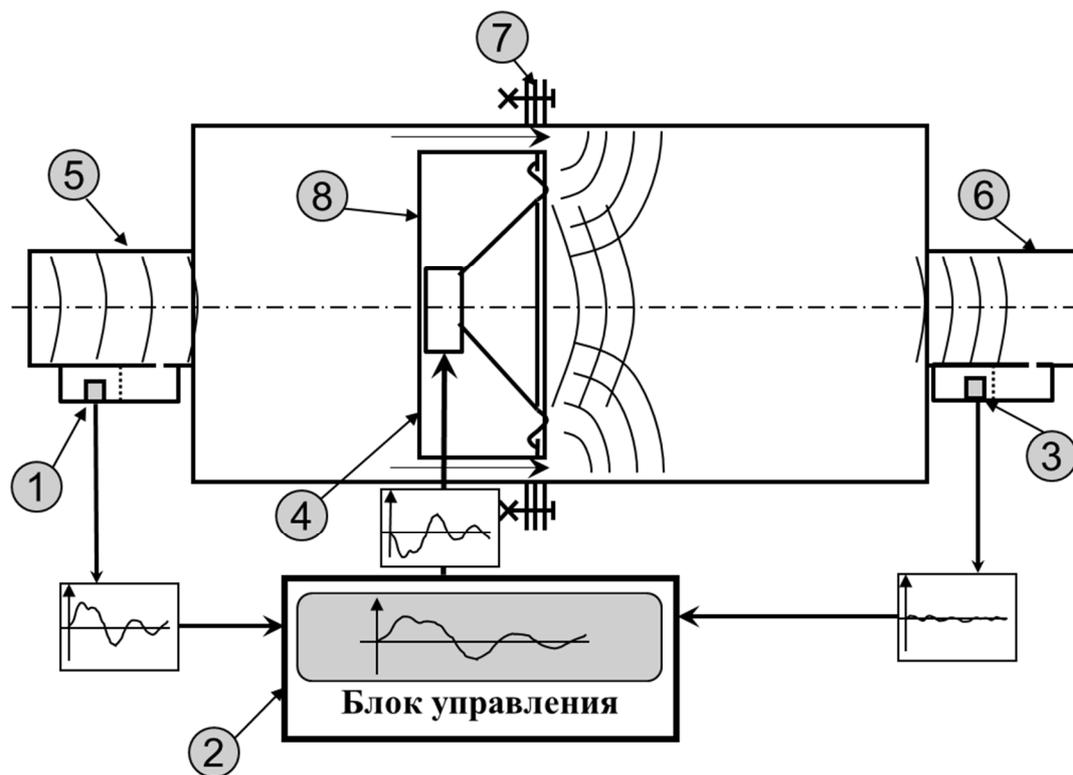
2. Глушитель обладает абсолютно жесткими стенками, от которых звук отражается полностью, без поглощения.

3. При рассмотрении внезапных сужений и расширений принимаем, что проходные сечения различаются незначительно, то есть присоединенная масса равна нулю.

4. Примем, что на волновое число оказывает влияние лишь частота.

5. Отбрасываются влияние квантования сигнала по амплитуде при аналого-во-цифровом преобразовании и недостатки целочисленной арифметики блока управления.

6. Амплитудно-частотные характеристики усилителя и громкоговорителя принимаются линейными.



1 – датчик опорного сигнала; 2 – блок управления; 3 – датчик остаточного сигнала; 4 – громкоговоритель; 5 – передняя часть корпуса; 6 – задняя часть корпуса; 7 – опорная пластина; 8 – защитный кожух динамика.

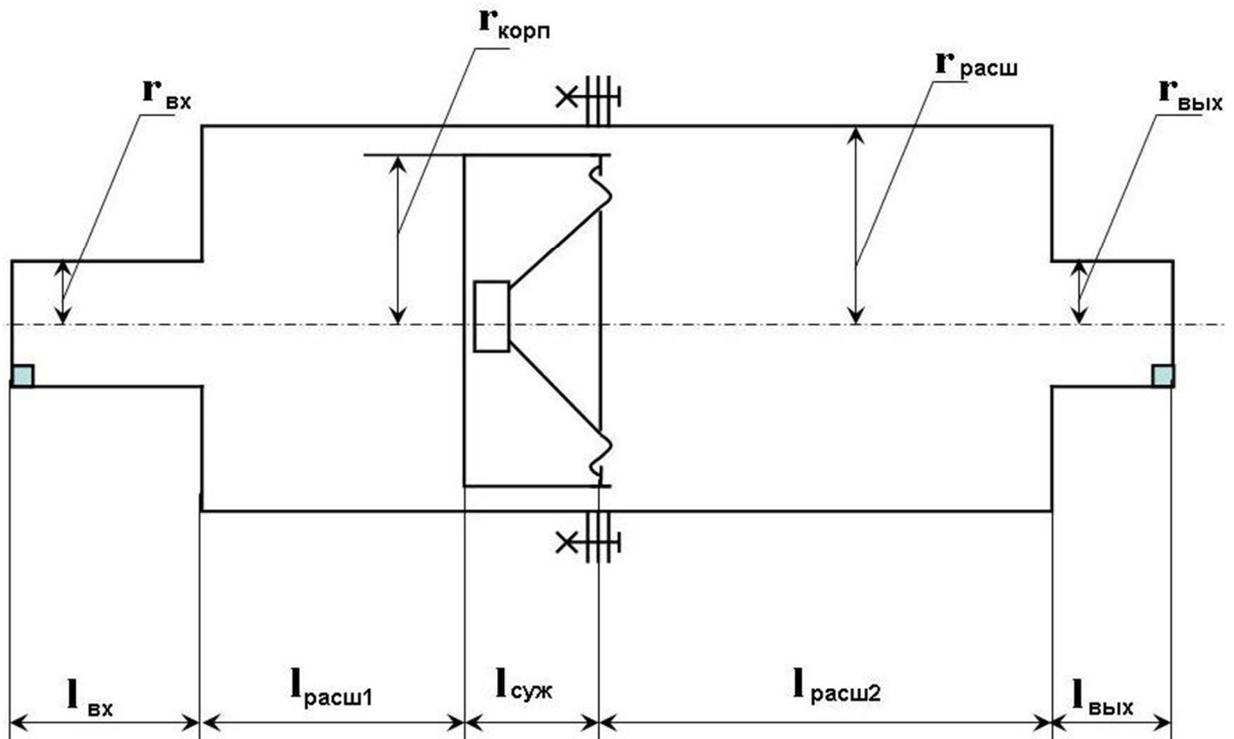
Рисунок 17 – Работа САШ в глушителе

В качестве входных параметров модели принимаем значения всех геометрических параметров глушителя (Рисунок 18).

С целью сохранения единообразия и снижения объема текстовой подписи рисунков, поясняющей параметры глушителя, характерные для графиков, дальше в данном подпункте диссертации будут представлены графики, соответствующие ГШАТ, имеющему следующие геометрические размеры:

$$\begin{array}{llll}
 r_{\text{корп}} = 0,075 \text{ м}; & l_{\text{вх}} = 0,4 \text{ м}; & r_{\text{расш}} = 0,105; & l_{\text{расш1}} = 0,25; \\
 l_{\text{расш2}} = 0,2 \text{ м}; & l_{\text{суж}} = 0,09 \text{ м}; & r_{\text{вых}} = 0,035; & l_{\text{вых}} = 0,2 \text{ м};
 \end{array}$$

Глушитель разбивается на две зоны? разделенные плоскостью диффузора динамика: переднюю (FRONT) и заднюю (BACK). При этом между ними располагается зона акустического суммирования исходного и вторичного сигналов, отмеченная на рисунке областью со знаком  $\Sigma$ . Зона, в которой поток газов проходит в кольцевой зазор между стенками глушителя и защитным корпусом динамика (Рисунок 18), с целью упрощения заменена внезапным сужением с аналогичной площадью сечения.

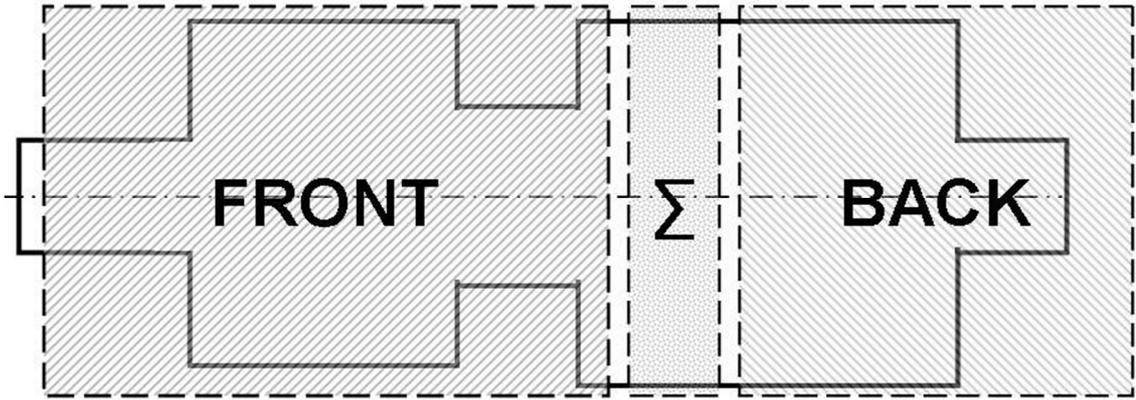


$r_{вх}$  – внутренний радиус входного патрубка;  $l_{вх}$  – длина входного патрубка;  
 $r_{расш}$  – внутренний радиус зоны расширения;  $l_{расш1}$  – длина первой части зоны расширения;  $l_{расш2}$  – длина второй части зоны расширения;  $l_{суж}$  – длина зоны сужения;  
 $r_{вых}$  – внутренний радиус выходного патрубка;  $l_{вых}$  – длина выходного патрубка.

Рисунок 18 – Глушитель шума активного типа (ГШАТ)

Вторым этапом является определение импульсных характеристик передней и задней частей глушителя (Рисунок 19).

Теперь каждая зона разбивается на отдельные участки простейшей формы с постоянным сечением (Рисунок 20).



FRONT – передняя часть глушителя; BACK – задняя часть глушителя;

$\Sigma$  - зона акустического суммирования.

Рисунок 19 – Структурная модель ГШАТ

Для каждого такого участка определяем:

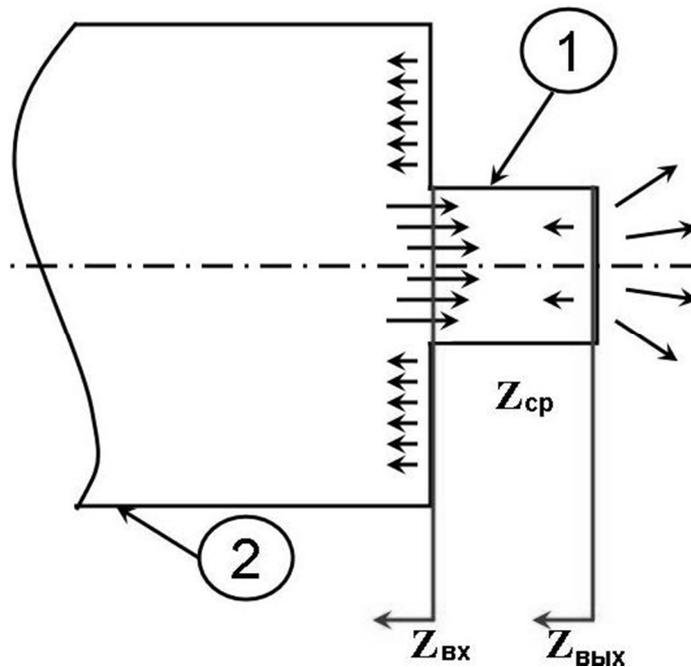
1. Импеданс среды:

$$Z_{cp} = S \cdot \rho \cdot c, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь сечения данной части глушителя,  $m^2$ ;

$\rho$  – плотность потока ОГ,  $kg/m^3$ ;

$c$  – скорость звука в потоке ОГ,  $m/s$ .



1 – выпускной патрубок; 2 – расширительная часть.

Рисунок 20 – Структурная схема задней части глушителя

2. Выходной импеданс, который зависит от входного импеданса предыдущей части глушителя или среды, в которую производится выброс газов.

Для выпускного патрубка:

$$Z_{вых} = Z_{cp} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot J_1(2 \cdot k \cdot r_{вых})}{2 \cdot k \cdot r_{вых}} + i \cdot \frac{S_1(2 \cdot k \cdot r_{вых})}{k \cdot r_{вых}} \right], \quad (2)$$

где  $k$  – волновое число;

$r_{вых}$  – радиус выпускного патрубка, м;

$J_1(x)$  – функция Бесселя первого рода;

$S_1(x)$  – функция Струве первого рода;

Для зон сужений и расширений:

$$Z_{вых} = \left( \frac{S}{S_{пред}} \right)^2 \times (Z_{вх.пред} - i \cdot 2\pi \cdot f \cdot M), \quad (3)$$

где  $S$ ,  $S_{пред}$  – площади сечения исследуемого и предшествующего участков глушителя, м<sup>2</sup>;

$Z_{вх.пред}$  – механический импеданс предшествующего участка глушителя;

$M$  – присоединенная масса, кг;

$f$  – частота, Гц.

Присоединенная масса  $M$  может быть определена из уравнения

$$M = \frac{S^2}{4 \cdot r \cdot \Phi \left( \frac{r_{пред}}{r} \right)}, \quad (4)$$

где  $r$ ,  $r_{пред}$  – радиусы исследуемого и предшествующего участков глушителя, м;

$\Phi(x)$  – функция Фока.

Функция Фока определяется из следующей зависимости [58]:

$$\Phi(\xi) = 1 - 1,41\xi + 0,34\xi^3 + 0,07\xi^5 \quad (5)$$

3. Входной импеданс, который определяется из следующей зависимости:

$$Z_{вх} = Z_{cp} \times \frac{Z_{вых} \cdot ch(k \cdot l) + i \cdot Z_{cp} \cdot sh(k \cdot l)}{Z_{cp} \cdot ch(k \cdot l) + i \cdot Z_{вых} \cdot sh(k \cdot l)}, \quad (6)$$

где  $l$  – длина исследуемой зоны, м;

## 4. Комплексный коэффициент отражения

$$R_{отр} = \frac{Z_{вых} - Z_{ср}}{Z_{вых} + Z_{ср}} \quad (7)$$

Также определяются амплитуды и сдвиг фазы для каждой частоты

$$\begin{cases} |R| = \sqrt{\text{Re}(R)^2 + \text{Im}(R)^2} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(R)}{\text{Re}(R)}\right) \end{cases} \quad (8)$$

## 5. Комплексный коэффициент прохождения волн.

Сначала определяем амплитудный спектр

$$|W| = 1 - |R| \quad (9)$$

Принимаем, что сдвиг фаз при прохождении аналогичен сдвигу при отражении, поэтому комплексный коэффициент прохождения равен:

$$W = |W| \cdot e^{i\varphi} \quad (10)$$

После расчёта комплексных коэффициентов прохождения для всех участков, входящих в каждую из зон, определяем передаточные характеристики передней и задней частей глушителя по следующей формуле:

$$K = \prod_{j=1}^n W_j, \quad (11)$$

где  $n$  – число простейших участков, относящихся к зоне;

$\Pi$  – оператор произведения компонентов массива.

Полученные зависимости разбиваются на  $N$  равноотстоящих точек в диапазоне частот от 0 до половины частоты дискретизации исходного акустического сигнала.

Увеличение числа  $N$  позволяет свести до минимума ошибку расчета, но при этом значительно возрастает время вычислений.

В результате дискретизации передаточных характеристик передней и задней зон глушителя получаем два вектора  $X^{FRONT}$  и  $X^{BACK}$ .

$$\begin{cases} X_j^{FRONT} = K^{FRONT} \left( \frac{j}{2 \cdot (N-1)} \cdot f_{дискр} \right) \\ X_j^{BACK} = K^{BACK} \left( \frac{j}{2 \cdot (N-1)} \cdot f_{дискр} \right) \end{cases} \quad j \in 0 \dots N-1, \quad (12)$$

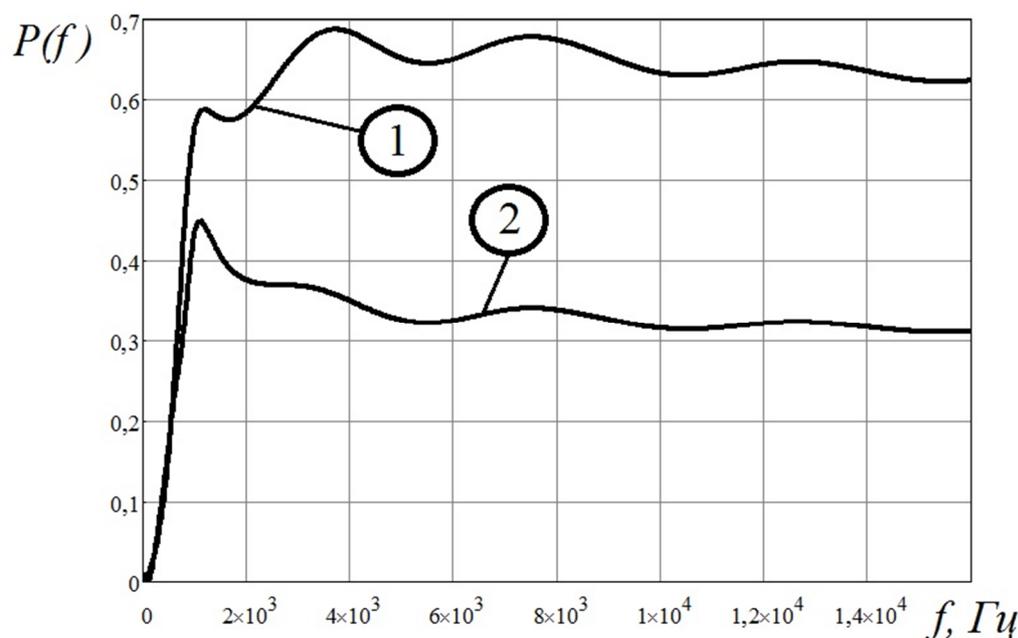
где  $K^{FRONT}(f)$ ,  $K^{BACK}(f)$  – передаточные характеристики передней и задней зон глушителя;

$f_{дискр}$  – частота дискретизации исходного звукового файла, Гц.

Для получения импульсных характеристик передней и задней зон глушителя над данными векторами производится обратное преобразование Фурье

$$\begin{cases} FRONT_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k^{FRONT} \cdot e^{\frac{2\pi \cdot i}{N} \cdot k \cdot j} \\ BACK_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k^{BACK} \cdot e^{\frac{2\pi \cdot i}{N} \cdot k \cdot j} \end{cases}, j \in 0 \dots N-1, \quad (13)$$

Импульсные характеристики, получаемые после обратного преобразования Фурье дискретизированных АЧХ, показанных на рисунке 21, представлены на рисунке 22. Расчет передаточных функций осуществлялся в программном обеспечении MathCad, программа представлена в приложении А.



1 – передняя часть, 2 – задняя часть.

Рисунок 21 – Амплитудно-частотные характеристики частей глушителя

На третьем этапе расчёта производим свертку вектора исходного сигнала (INPUT) с импульсной характеристикой передней зоны глушителя, что в частотной области соответствует фильтрации спектра исходного сигнала передаточной функцией данной зоны

$$OUT_k = \sum_{j=0}^{N-1} FRONT_j \cdot INPUT_{k-j}, \quad (14)$$

где OUT – вектор амплитуд сигнала, полученного прохождением исходного звукового сигнала INPUT (Рисунок 23) через переднюю зону глушителя, обозначенную на рисунке 19 знаком FRONT.

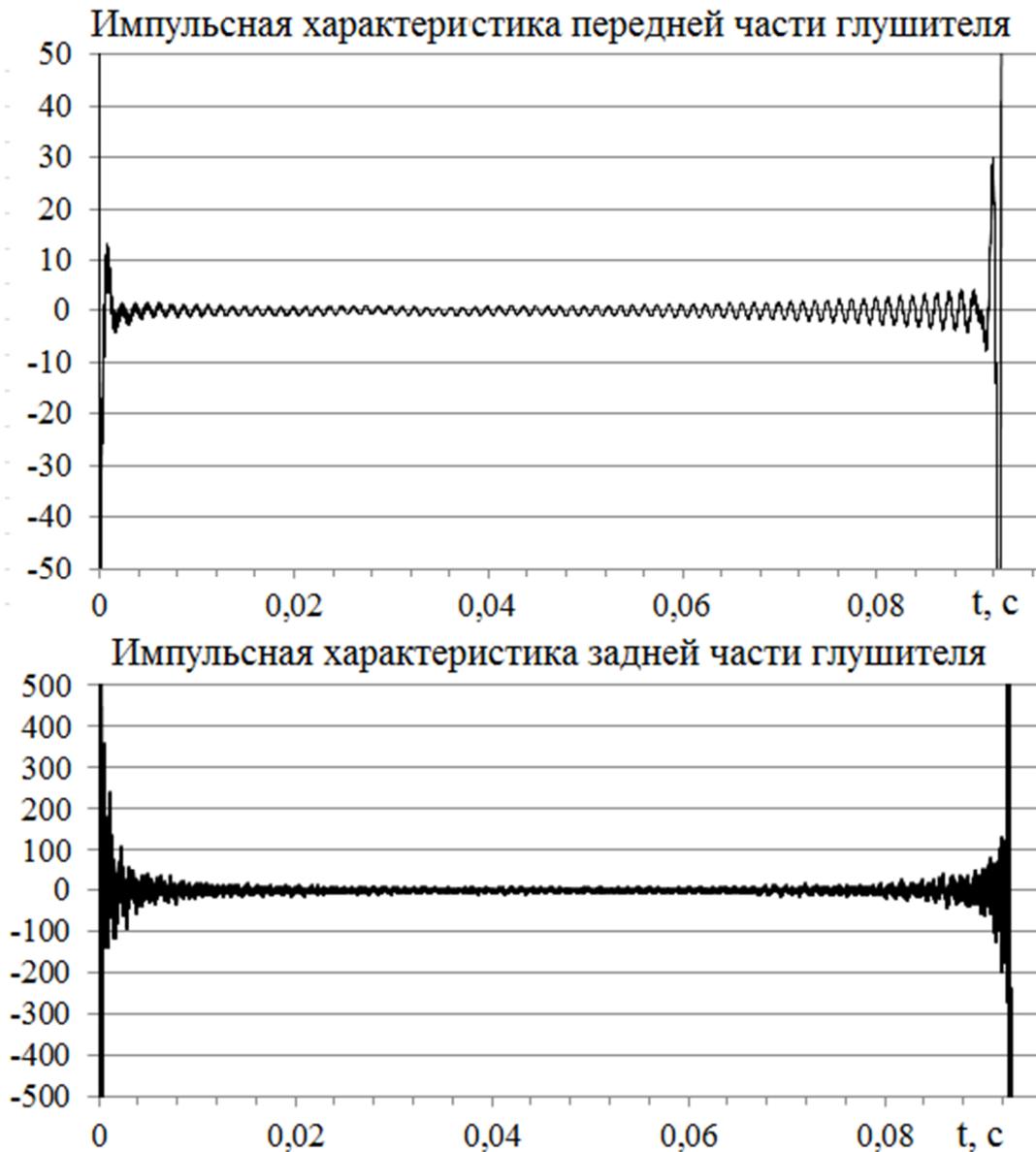


Рисунок 22 – Импульсные характеристики передней и задней частей глушителя

Полученный вектор (OUT) является опорным сигналом для адаптивного алгоритма, заложенного в блок управления.

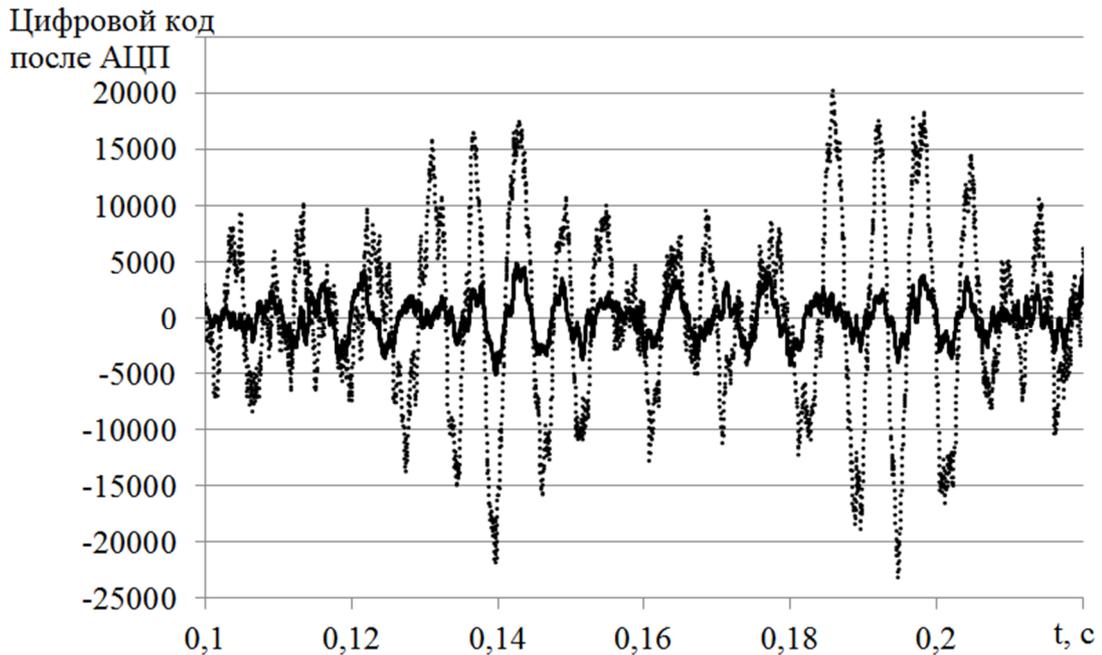


Рисунок 23 – Представление вектора входного сигнала INPUT и сигнала OUT, характеризующего потерю амплитуды после прохождения передней части глушителя (штриховая линия – сигнал INPUT, сплошная линия – сигнал OUT).

Структура адаптивного алгоритма выглядит следующим образом [3]. Оптимальные характеристики адаптивного алгоритма принимаем из литературных источников ( $N = 128$ ) [56]. Используя заранее полученные векторы опорного сигнала (OUT) и весовых коэффициентов фильтра ( $W$ ), получаем новое значение амплитуды вторичного сигнала ( $Y$ ) их сверткой

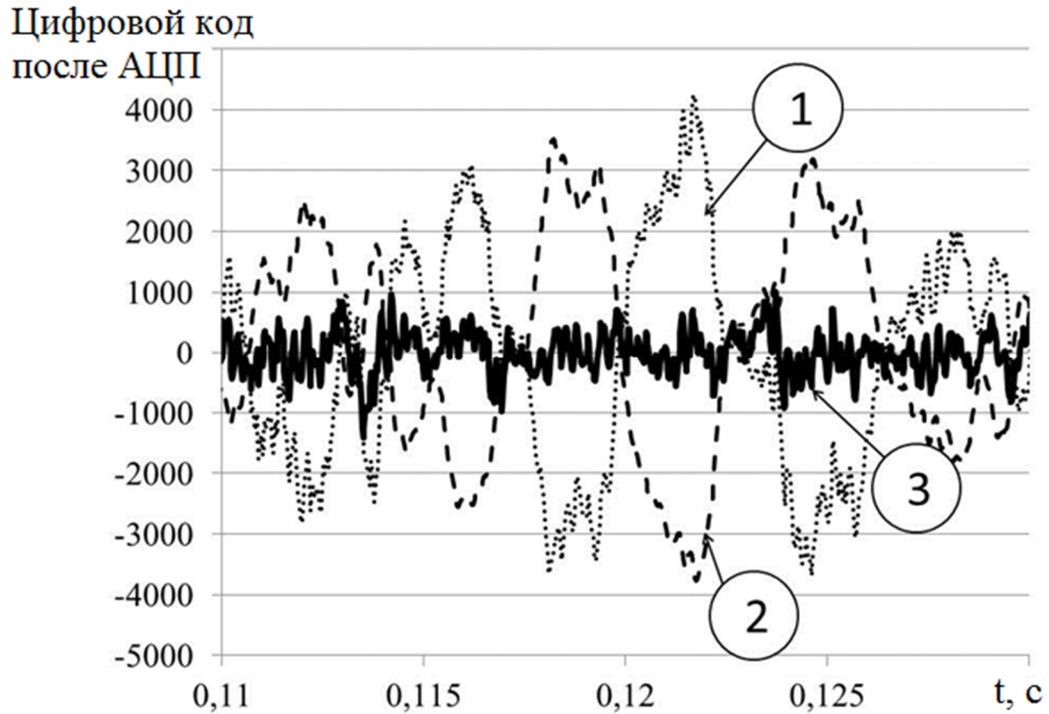
$$Y_k = \sum_{j=0}^{N-1} OUT_{k-j} \cdot W_j(k), \quad (15)$$

где  $W(k)$  – значение вектора весовых коэффициентов на  $k$  – м отсчете.

Зная значение исходного и вторичного сигналов, определяем значение сигнала ошибки (остаточного шума) на данном отсчёте

$$OST_k = OUT_k + Y_k, \quad (16)$$

Временное представление амплитуд сигналов до (OUT) и после (OST) зоны акустического суммирования показано на рисунке 24.



1 – входящий в зону акустического суммирования сигнал OUT;

2 – генерируемый ИАЗ сигнал Y; 3 – результирующий сигнал OST.

Рисунок 24 – Временное представление амплитуд сигналов до и после зоны акустического суммирования

Рассчитываем мощность опорного сигнала (POW) и определяем значение фактора сходимости ( $\mu$ )

$$\begin{cases} POW(k) = \sum_{j=0}^{N-1} OUT_j^2 \\ \mu(k) = \frac{N-1}{POW} \end{cases} \quad (17)$$

Обновляем значение вектора весовых коэффициентов для следующего цикла расчетов:

$$W_j(k+1) = W_j(k) + 2 \cdot \mu(k) \cdot OUT_k \cdot OST_k \quad (18)$$

Результатом обработки адаптивным алгоритмом опорного сигнала является вектор остаточного шума (OST), представленный на рисунке 24. Этот вектор содержит амплитуды звукового сигнала, полученные прохождением опорного сигнала (OUT) через зону акустического суммирования звуковых волн.

На четвертом этапе производим свертку вектора остаточного шума (OST) с импульсной характеристикой задней части глушителя (BACK), что соответствует фильтрации спектра остаточного шума характеристикой задней части

$$OUTPUT_j = \sum_{k=0}^{N-1} BACK_k \cdot OST_{j-k}, \quad (19)$$

где  $OUTPUT$  – вектор амплитуд сигнала, полученного прохождением остаточного звукового сигнала  $OST$  через заднюю зону глушителя.

Временное представление сигналов  $OST$  и  $OUTPUT$  представлено на рисунке 25. В результате получаем вектор амплитуд звукового сигнала выходящего из глушителя. Как видно из рисунка, данный сигнал имеет выраженный высокочастотный характер.

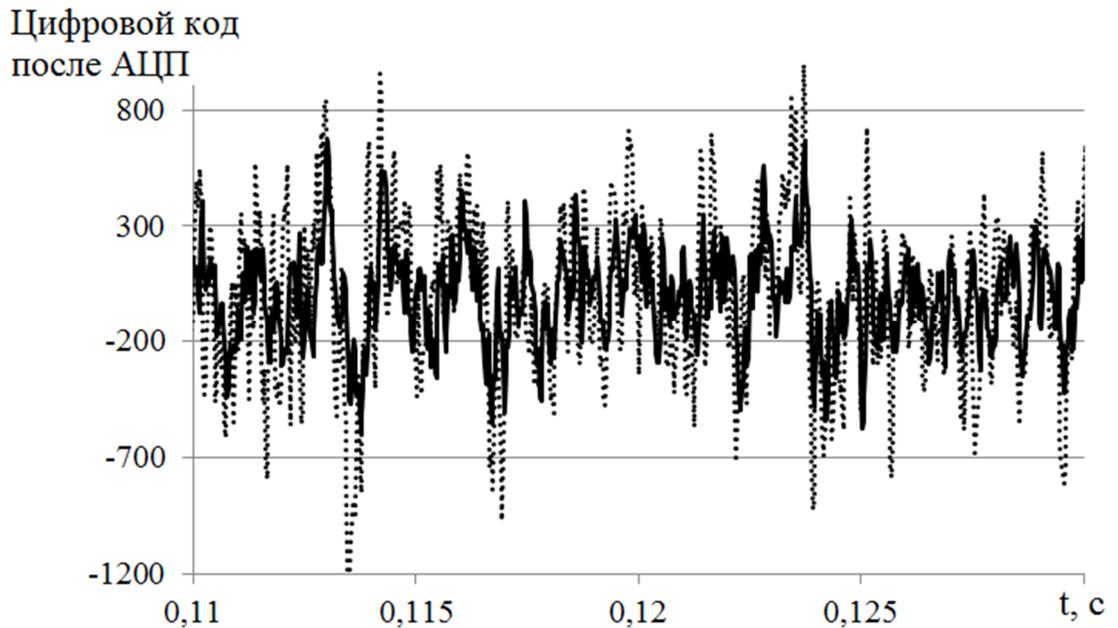


Рисунок 25 - Временное представление сигналов до и после задней части глушителя (штриховая линия – сигнал  $OST$ , сплошная линия – сигнал  $OUTPUT$ ).

После этого производим преобразование Фурье исходного ( $INPUT$ ) и выходного ( $OUTPUT$ ) шумов

$$\begin{cases} S_k^{INPUT} = \sum_{j=0}^{N-1} INPUT_j \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot i}{N} \cdot k \cdot j} \\ S_k^{OUTPUT} = \sum_{j=0}^{N-1} OUTPUT_j \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot i}{N} \cdot k \cdot j} \end{cases}, k \in 0 \dots N-1 \quad (20)$$

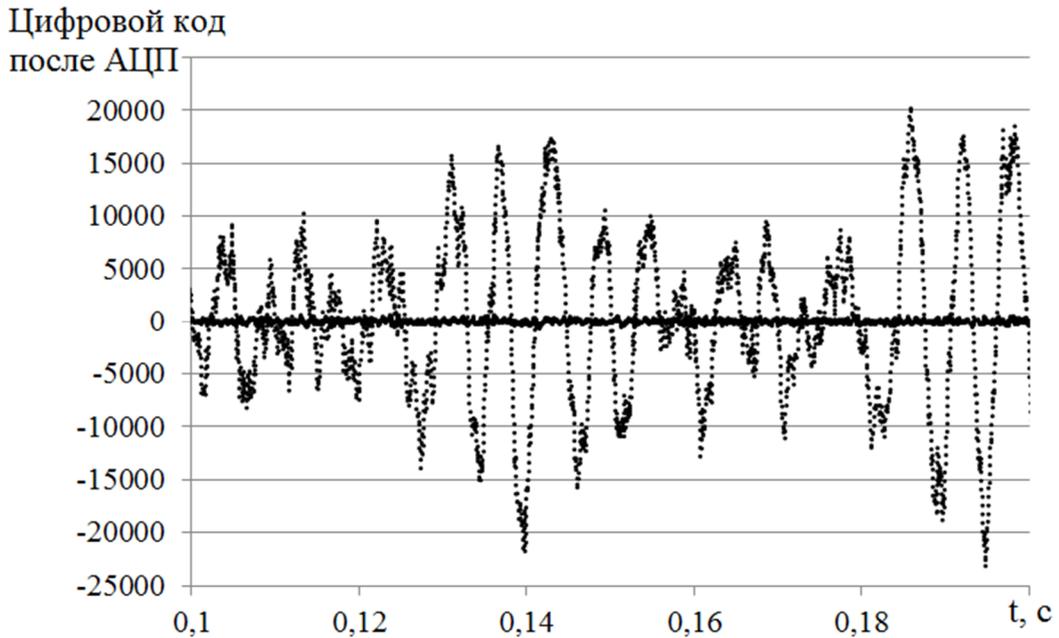


Рисунок 26 – Временное представление сигналов до и после ГШАТ (штриховая линия – входящий в глушитель сигнал INPUT, сплошная линия – выходящий из глушителя сигнал OUTPUT).

В результате расчета по формуле (20) получаем узкополосные спектры входящего и выходящего сигналов (INPUT и OUTPUT). Графики данных спектров в области частот до 800 Гц показаны на рисунке 27.

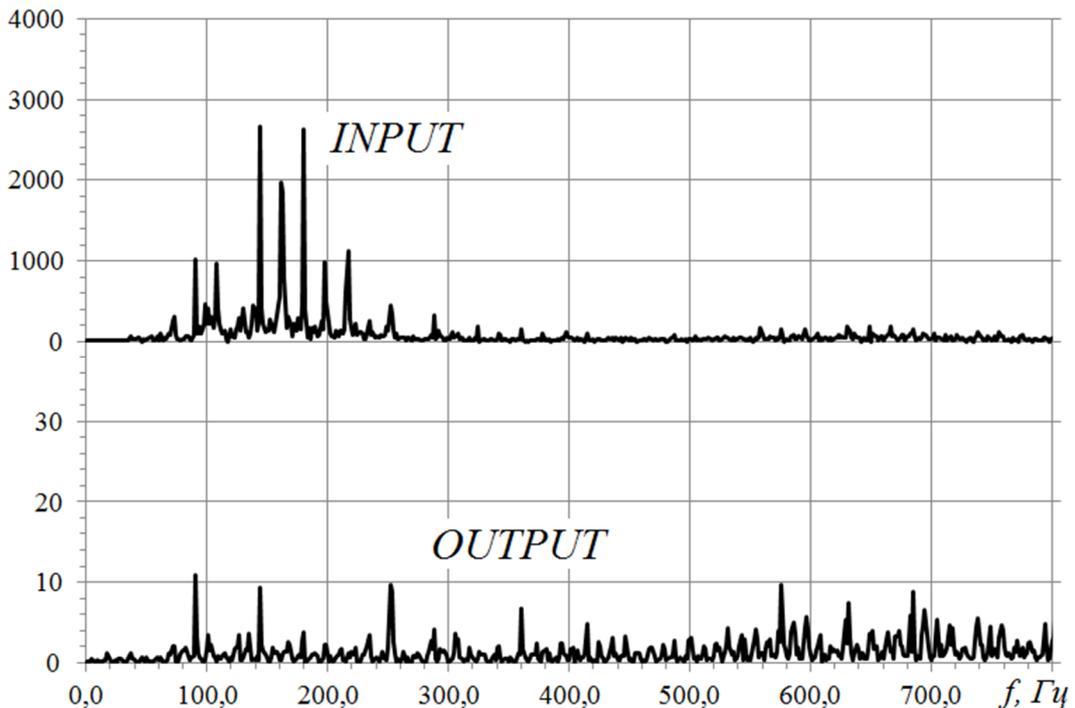


Рисунок 27 – Узкополосные спектры входного (INPUT) и выходного (OUTPUT) сигналов

Как видно из представленных графиков, в зоне низких частот до 250 Гц узкополосного спектра входного сигнала наблюдается некоторое количество тональных составляющих, которые отсутствуют в спектре выходного сигнала.

Для определения УЗД в октавных полосах частот используется метод энергетического суммирования значений амплитуд узкополосного спектра, находящихся в диапазоне частот каждой октавной полосы

$$\left\{ \begin{array}{l} NOISE_F^{INPUT} = 10 \cdot \lg \left[ \sum_{j=1}^m (S_{a+j}^{INPUT})^2 \right] \\ NOISE_F^{OUTPUT} = 10 \cdot \lg \left[ \sum_{j=1}^m (S_{a+j}^{OUTPUT})^2 \right] \end{array} \right\}, F \in 1 \dots B \quad (21)$$

где  $B$  – число исследуемых октавных полос частот;

$a$  – некоторый индекс вектора амплитуд узкополосного спектра, которому соответствует минимальная частота, находящаяся в границах октавной полосы с номером  $F$ ;

$m$  – число полос спектра, находящихся в границах октавной полосы с номером  $F$ .

Разность этих двух показателей - УЗД в октавных полосах частот шума до и после глушителя показывает эффективность применения глушителя шума, измеряемую в УЗД для каждой полосы частот.

Общая эффективность снижения шума, а также эффективность трех зон по отдельности представлены на рисунке 28.

Затем необходимо определить численное значение (RESULT), характеризующее эффективность снижения шума по следующей зависимости:

$$RESULT = 10 \cdot \lg \left( \sum_{F=1}^B 10^{\frac{NOISE_F^{INPUT} - NOISE_F^{OUTPUT}}{0,1}} \right) \quad (22)$$

Данная методика показывает основной принцип расчета эффективности ГШАТ с заданными геометрическими параметрами.

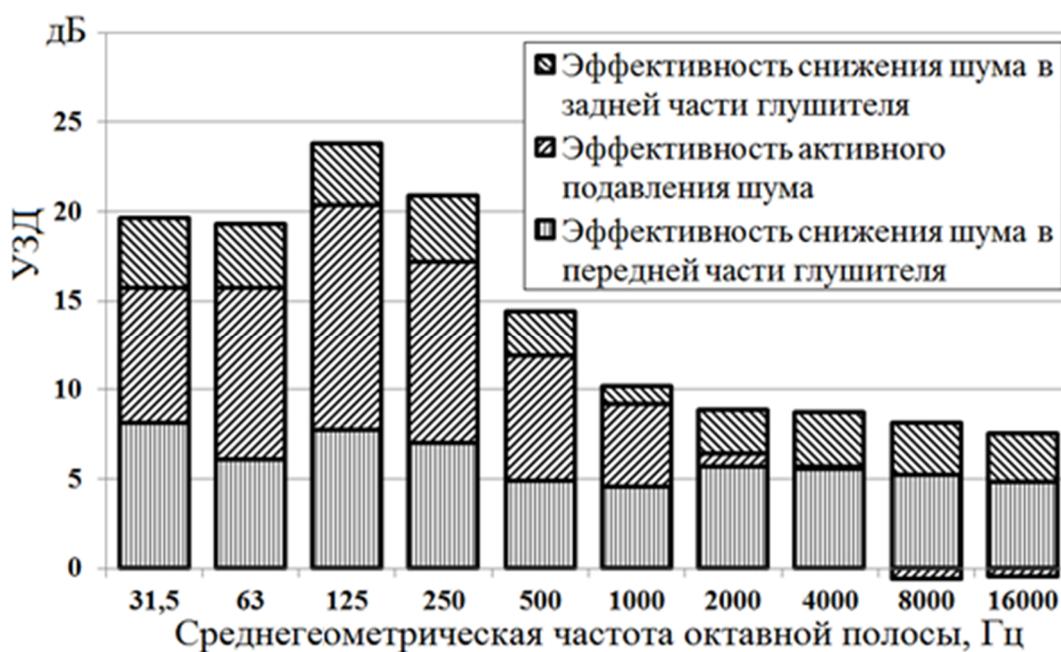


Рисунок 28 – Общая эффективность применения ГШАТ

## 2.2 Разработка математической модели рабочего процесса глушителя шума активного типа для определения развиваемого противодействия

Вторым по важности эксплуатационным показателем глушителей шума выпуска ОГ является развиваемое ими противодействие или аэродинамическое сопротивление.

Все применяемые на сегодняшний день глушители создают определенное сопротивление движению рабочей среды, оцениваемое потерей давления. Эти потери называются противодействием глушителей [37].

Повышение потерь давления в глушителе негативно влияет на процесс газообмена в двигателе, увеличивает коэффициент остаточных газов, нарушает нормальное протекание процессов смесеобразования и сгорания. В итоге это приводит к снижению технико-экономических показателей двигателя [11]. Установлено, что для двигателей внутреннего сгорания увеличение противодействия на 3000-5000 Па приводит к потере мощности 1,0 - 1,5 % [43].

Как утверждают многие авторы [80], влияние противодействия на общую эффективность глушителя достаточно велико, и может быть описано следующим выражением:

$$\Delta L = const + 10 \lg \Delta P, \quad (23)$$

где  $\Delta P$  – потери давления в системе выпуска ОГ.

О наличии связи между эффективностью глушителя и противодавлением свидетельствуют результаты исследований, представленные на рисунке 29.

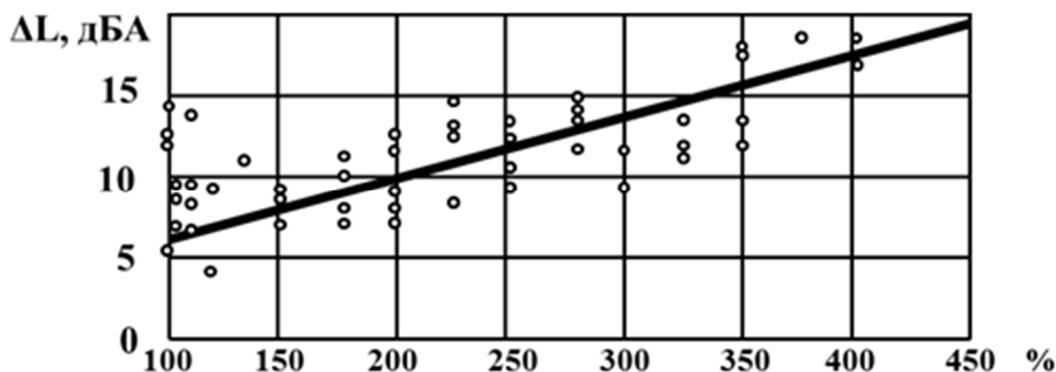


Рисунок 29 – Связь противодавления с эффективностью глушителей

Как видно из графика, при каждом увеличении противодавления на 100 % общая эффективность глушителей в среднем возрастает на 4 дБА [43].

Для того чтобы с требуемой точностью, но без напрасного усложнения определить потери давления в разрабатываемой конструкции глушителя шума, введем некоторые ограничения в создаваемую математическую модель:

1. Принимаем, что газовый поток имеет постоянное значение объёмного расхода газов  $Q = const$ , без пульсаций, вызываемых рабочим процессом ДВС.
2. Принимаем, что термодинамические характеристики потока, а также плотность, кинематическая вязкость, температура и состав ОГ являются постоянными в любой точке внутреннего объёма глушителя.
3. Глушитель обладает абсолютно жесткими стенками, упругая деформация которых отсутствует, а шероховатость поверхности незначительно влияет на общее аэродинамическое сопротивление.
4. При рассмотрении внезапных сужений и расширений принимаем, что отсутствуют срывы потока ОГ.

Для определения гидравлического сопротивления разрабатываемый ГШАТ был разбит на зоны. Общая схема представлена на рисунке 30.

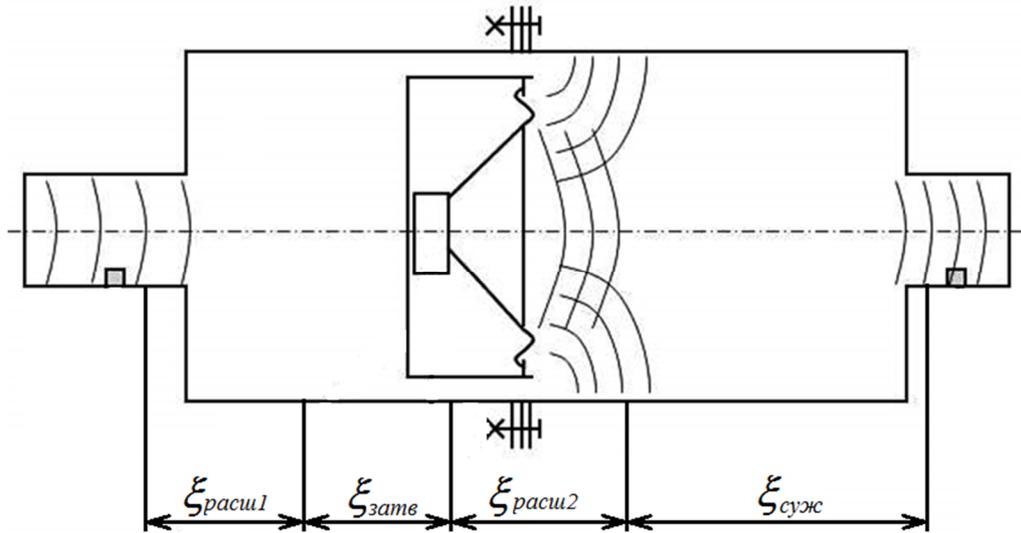


Рисунок 30 – Схема глушителя с коэффициентами сопротивления элементов конструкции

Суммарное сопротивление, создаваемое глушителем, при заданных геометрических параметрах может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta p_{\text{сум}} = \Delta p_{\text{расш1}} + \Delta p_{\text{затв}} + \Delta p_{\text{расш2}} + \Delta p_{\text{суж}}, \quad (24)$$

где  $\Delta p_{\text{расш1}}$ ,  $\Delta p_{\text{расш2}}$  - потери давления в зоне внезапного расширения, Па;

$\Delta p_{\text{затв}}$  - потери давления в зоне затвора, Па;

$\Delta p_{\text{суж}}$  - потери давления в зоне внезапного сужения.

Перепад давления на участках определяется по формуле

$$\Delta p_i = \xi_i \cdot \frac{\rho \cdot v_i^2}{2}, \quad (25)$$

где  $\xi_i$  – коэффициент газодинамического сопротивления  $i$ -го участка глушителя;

$\rho$  – плотность потока ОГ, кг/м<sup>3</sup>;

$v_i$  – скорость потока ОГ на  $i$ -м участке глушителя, м/с.

Плотность ОГ равна

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p_{\text{газ}}}{p_0} \cdot \frac{273}{T}, \quad (26)$$

где  $\rho_0$  – плотность ОГ при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;

$p_{\text{газ}}$  – давление газов, Па;

$p_0$  – давление газов в нормальных условиях, Па;

$T$  – температура ОГ, К.

Коэффициент газодинамического сопротивления при внезапном расширении потока равен

$$\xi_{расш} = \left(1 - \frac{S_{до}}{S_{после}}\right)^2, \quad (27)$$

где  $S_{до}$  – площадь поперечного сечения трубы до расширения, м<sup>2</sup>;

$S_{после}$  – площадь поперечного сечения после расширения, м<sup>2</sup>;

Коэффициент сопротивления внезапного сужения определяется по полуэмпирической формуле Идельчика Е.И [41]:

$$\xi_{суж} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_{после}}{S_{до}}\right) \quad (28)$$

Для расчета коэффициента сопротивления на среднем участке глушителя примем, что фронтальная стенка защитного корпуса динамика подобна дисковому затвору в глушителе. Воспользуемся эмпирической формулой для определения коэффициента сопротивления дискового затвора

$$\xi_{затв} = \frac{A}{Re} + \left(1 - \frac{50}{Re}\right) \cdot \zeta_{кв}, \quad (29)$$

где

$$A = 120 \cdot \frac{1 + 0,5\bar{r} \cdot (1 + \sin \delta)}{\left(1 - \bar{r}^2 \sin \delta\right)^2}, \quad (30)$$

$\delta$  – угол открытия клапана (в нашем случае  $\delta = 90^\circ$ ), °;

$$\bar{r} = \frac{r_{корп}}{r_{расш}}, \quad (31)$$

$r_{корп}$  – радиус защитного корпуса динамика, м;

$r_{расш}$  – внутренний радиус расширительной камеры глушителя, м;

$$Re = \frac{2 \cdot v_{затв} \cdot r_{расш}}{\eta}, \quad (32)$$

$Re$  – число Рейнольдса;

$\eta$  – кинематическая вязкость ОГ, м<sup>2</sup>/с;

$$\zeta_{кв} = \left( \frac{1,56}{1 - r \sin \delta} - 1 \right)^2, \quad (33)$$

$\zeta_{кв}$  - безразмерный эмпирический коэффициент.

Средняя скорость ОГ в  $i$ -м участке глушителя зависит от площади проходного сечения и объёмного расхода газов

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (34)$$

где  $Q$  – объёмный расход ОГ, м<sup>3</sup>/с;

$S$  – площадь проходного сечения, м<sup>2</sup>.

Внутренняя площадь распространения потока ОГ

$$S_i = \pi \cdot r_i^2, \quad (35)$$

где  $r_i$  – радиус  $i$ -го проходного сечения трубы глушителя, м.

Площадь проходного сечения потока для зоны между защитным кожухом динамика и внутренними стенками глушителя определяется по следующей зависимости:

$$S_{прох} = \pi (r_{расш}^2 - r_{корн}^2) \quad (36)$$

Если учесть, что  $\delta = 90^\circ$ , суммарные потери давления находятся в сложной зависимости от термодинамических параметров потока выхлопных газов ( $\rho_0, p_{газ}, p_0, T, \eta, Q$ ) и геометрических параметров проектируемого глушителя (Рисунок 18).

После многочисленных упрощений формула для подсчета суммарных потерь давления проектируемой конструкции ГШАТ может быть представлена следующим образом:

$$\Delta p_{\text{сум}} = 136,5 \cdot \frac{\rho_0 \cdot P_{\text{газ}} \cdot Q^2}{\rho_0 \cdot T \cdot \pi^2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{r_{\text{вх}}^2} - \frac{1}{r_{\text{раси}}^2} \right)^2 + \frac{1}{2} \times \left( \frac{r_{\text{раси}}^2 - r_{\text{вых}}^2}{r_{\text{раси}}^4} \right) + \frac{1}{Q \cdot r_{\text{раси}}^2 (r_{\text{раси}} - r_{\text{корн}})} \left( 60\pi \cdot \eta \cdot r_{\text{раси}}^2 + (Q \cdot r_{\text{раси}} - 25\pi \cdot \eta \cdot (r_{\text{раси}}^2 - r_{\text{корн}}^2)) \right) \cdot \left( 0,56 + \frac{r_{\text{корн}}}{r_{\text{раси}}} \right) + \left( \frac{1}{r_{\text{раси}}^2 - r_{\text{корн}}^2} - \frac{1}{r_{\text{раси}}^2} \right)^2 \right] \quad (37)$$

Наибольший вклад в формирование аэродинамического сопротивления вносят 2 параметра - объёмный расход газов  $Q$ , от которого напрямую зависит средняя скорость потока газов в проходных сечениях, и внутренний радиус расширительной камеры глушителя  $r_{\text{раси}}$ , от которого зависят соотношения размеров всех проходных сечений.

Многие геометрические параметры глушителя связаны с конструкцией трактора и применяемого динамика (диаметр выходного патрубка коллектора и др.), поэтому такие параметры, как  $r_{\text{вх}}$ ,  $r_{\text{вых}}$  и  $r_{\text{корн}}$ , будем считать второстепенными, так как диапазон их варьирования весьма ограничен.

Кроме этого, вследствие особого расположения глушителя шума выпуска, характерного для тракторной техники, с целью обеспечения максимальной обзорности серьезно ограничен максимальный диаметр глушителя, и, следовательно,  $r_{\text{раси}}$ . Хотя для достижения минимума потерь давления в глушителе при различном объёмном расходе  $Q$  (характерном для разных режимов работы двигателя) целесообразно использовать значение  $r_{\text{раси}} = 0,13 - 0,15$  м. Как видно из представленных на рисунке 31 графиков, минимальное значение суммарных потерь давления, определяемых по (37), достигается, когда значение  $r_{\text{раси}}$  лежит именно в этом диапазоне, в независимости от объёмного расхода выхлопных газов, протекающих через глушитель.

Моделирование потерь давления в глушителе осуществлялось с использованием программы MathCad. Программа расчета приведена в приложении Б.

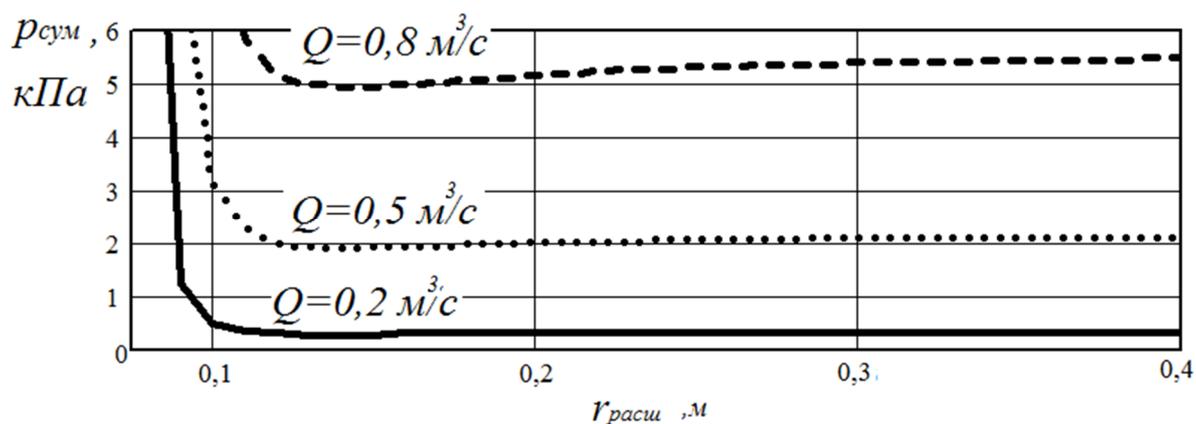


Рисунок 31 – Зависимость потерь давления от внутреннего диаметра расширительной части глушителя ( $r_{вх} = 0,04$  м;  $r_{вых} = 0,04$  м;  $r_{корн} = 0,075$  м);

### 2.3 Методика определения наиболее рациональных геометрических параметров глушителя шума активного типа

Предлагаемая структурная схема методики определения рациональной конструкции ГШАТ приведена на рисунке 32.

Вначале необходимо создать матрицу входных значений, которая будет использоваться в модуле формирования вектора входных данных. Матрица входных значений представляет собой двумерный массив значений, каждая строка которого содержит некоторое число переменных величин, которые от строки к строке постепенно изменяются согласно выбранному шагу и исходному минимальному значению, определяемому накладываемыми на переменную ограничениями. В качестве переменных для поиска рациональных характеристик используются геометрические параметры глушителя, которые не находятся во взаимосвязи с трактором (например,  $r_{вх}$ , напрямую связан с внешним диаметром выходного коллектора, на который устанавливается глушитель, и не может быть изменен,  $r_{корн}$  связан с параметрами применяемого ИАЗ). Указанные переменные параметры представлены на рисунке 18.

Общая формула для создания  $k$ -го столбца матрицы входных значений может быть представлена в следующем виде:

$$\Omega_{\sum_{i=0}^{M-1} A_i \cdot N^i}^k = l_{\min} + A_k \cdot \Delta l, \quad (38)$$

где  $N$  – число вариаций переменных параметров;

$M$  – общее число параметров, принятых в качестве переменных;

$l_{\min}$  – минимальное значение переменного параметра, который занимает  $k$ -й столбец матрицы входных значений;

$\Delta l$  – шаг изменения переменного параметра, зависящий от накладываемых ограничений и числа вариаций  $N$ ;

$A_i$  – некоторое переменное целое число, соответствующее каждому  $i$ -му параметру.

При этом  $A_i \in [0; M-1]$ ;  $k$  – номер столбца, соответствующий отдельному переменному параметру. При этом  $k \in [0; N-1]$ .

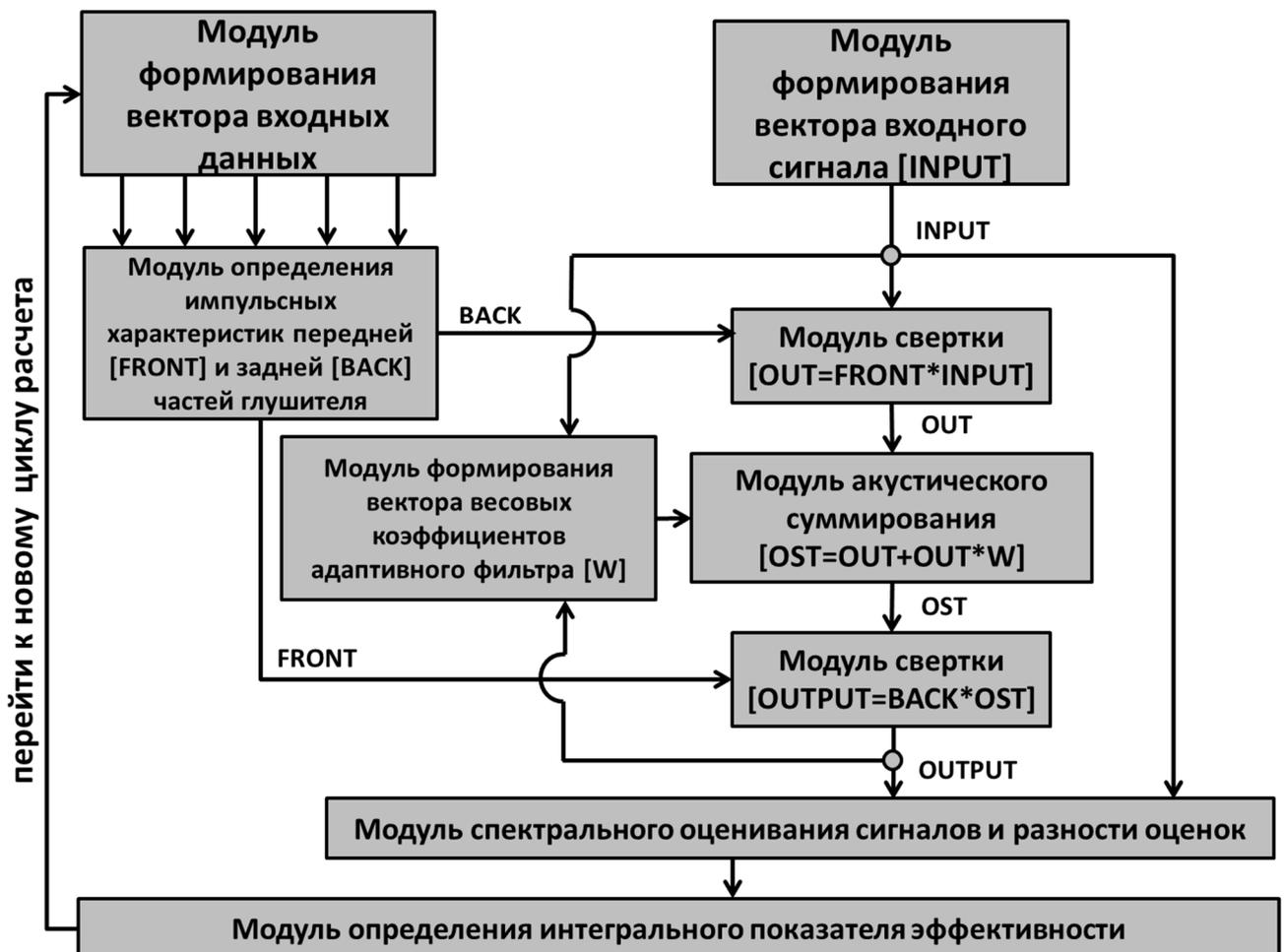


Рисунок 32 – Структурная модель методики определения рациональной конструкции ГШАТ

Задать входную матрицу можно, используя  $N$  вложенных циклов, с постепенным инкрементом в каждом новом цикле одного уровня отдельного  $A_i$ , при этом внутри самого «глубокого» цикла необходимо последовательно произвести присвоение значений каждому столбцу по (71).

Благодаря этому в каждой строке матрицы входных значений будет содержаться оригинальный набор переменных параметров, который никогда не повторяется. При этом следует учитывать, что общее число строк матрицы, а следовательно, и возможных вариантов наборов значений геометрических параметров глушителя, определяется из следующей зависимости:

$$\Xi = N^M \quad (39)$$

Это означает, что, например, для пяти переменных геометрических параметров ( $M = 5$ ) с пятью возможными вариациями общее количество строк матрицы составит 3125.

Вторым этапом является создание звукового файла, который будет использоваться для нахождения наиболее рациональных характеристик глушителя. Данный файл должен представлять собой цифровую запись шума процесса выпуска исследуемого трактора со снятым глушителем. Перед использованием данный файл подвергается частотной корректировке с целью компенсации неровностей АЧХ микрофона и усилительного тракта.

По сути, данный файл представляет собой вектор значений амплитуд исходного шума, поступающего в глушитель. От того, насколько звуковой файл соответствует звуковым волнам, поступающим с глушитель, будет зависеть адекватность предлагаемой модели поиска рациональных параметров, поэтому при записи и подборе файла необходимо проявлять высокую степень ответственности.

Третьим этапом является определение и непосредственный поиск наиболее рациональных параметров ГШАТ, которым соответствует наибольшая эффективность его работы. Алгоритм поиска оптимальных геометрических параметров глушителя может быть представлен следующим образом:

1. Вначале модуль формирования вектора входных данных выбирает из матрицы входных значений строку под номером, соответствующим данной итерации моделирования.

2. Производится расчет импульсных характеристик передней *FRONT* и задней *BACK* частей глушителя шума по методике, описанной в пункте 2.1 диссертации.

3. Осуществляется свертка вектора сигнала исходного шума *INPUT* с импульсной характеристикой передней части *FRONT* глушителя по формуле (14). В результате получаем вектор *OUT*.

4. Полученный сигнал обрабатывается адаптивным алгоритмом, заложенным в блок управления [77]. Этот алгоритм предусматривает фиксацию в данный момент времени выборки исходного шума *INPUT* и остаточного шума на срезе выхлопной трубы *OUTPUT*. Эти значения позволяют обновить вектор весовых коэффициентов *W*, свертка которого с вектором *OUT* по формуле (15) дает сигнал *Y*, характеризующий уровень звукового давления, создаваемого вторичным источником. В результате акустического суммирования *OUT* и *Y* получаем вектор остаточного сигнала *OST* по формуле (16). Этот шаг отмечен тремя блоками, в названии которых пояснены выполняемые операции.

5. Производим свертку вектора остаточного шума *OST* с импульсной характеристикой вторичной части глушителя *BACK* по (19). Полученный сигнал *OUTPUT* характеризует шум выхлопа. Нижний модуль на схеме (Рисунок 32).

6. Производится спектральная оценка эффективности применения глушителя шума разностью спектров входного и выходного сигналов по формуле (20).

7. Определяется интегральная оценка эффективности глушителя единственным числовым параметром (в дБА) по формулам (21, 22), величина которого и является критерием выбора рациональных геометрических параметров ГШАТ. Значение данного параметра записывается в выходной вектор.

8. Если не все строки матрицы входных значений участвовали в расчете, алгоритм повторяется с заменой исходного вектора новой строкой входных параметров.

9. Если расчеты для каждой строки матрицы входных значений проведены, определяется индекс, соответствующий максимальному значению в выходной матрице. Из матрицы входных значений подбирается строка, соответствующая данному индексу. Значения геометрических параметров, записанные в данной строке, следует признать наиболее рациональными.

Используя описанную выше методику, можно подобрать параметры глушителя шума, которые обеспечат пик его эффективности.

## 2.4 Выводы

1. Разработанная методика расчета при заданных геометрических параметрах глушителя и параметрах адаптивного БУ позволяет определить эффективность применения глушителей шума, использующих как пассивные элементы, так и САШ. Сущность методики заключается в представлении компонентов глушителей в качестве акустических фильтров с конечной импульсной характеристикой и использовании расчетов как во временных так и в частотных областях, так как эффективность адаптивного БУ зависит от временных характеристик акустического сигнала.

2. Найденная взаимосвязь между наиболее значимыми геометрическими параметрами ГШАТ и аэродинамическим сопротивлением, оказываемым внутренней полостью глушителя потоку ОГ, позволила определить наиболее рациональный радиус внутренней полости расширительной камеры при различных режимах нагружения, равный  $r_{расш} = 0,13 - 0,15$  м.

3. Разработанная методика поиска наиболее рациональных параметров ГШАТ позволила подобрать геометрические размеры глушителя, обеспечивающие его наибольшую эффективность. Данные геометрические размеры соответствуют номеру 635 в строке матрицы исходных данных и равны:

$$\begin{array}{llll} r_{корп} = 0,075 \text{ м}; & l_{вх} = 0,4 \text{ м}; & r_{расш} = 0,105; & l_{расш1} = 0,25; \\ l_{расш2} = 0,2 \text{ м}; & l_{суж} = 0,09 \text{ м}; & r_{вых} = 0,035; & l_{вых} = 0,2 \text{ м}; \end{array}$$

### **3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

#### **3.1 Задачи и программа исследований**

Теоретические исследования позволили подобрать конструктивные характеристики ГШАТ, обеспечивающие максимальное снижение уровней шума выпуска. Однако теоретические исследования не позволяют учитывать все многочисленные факторы, оказывающие влияние на работу предлагаемого технического решения в стандартных условиях реальной эксплуатации. Поэтому результаты теоретических исследований были подвергнуты экспериментальной проверке с целью уточнения и подтверждения достоверности предлагаемой методики.

Целью экспериментальных исследований являлось:

1. Определение наиболее рациональных параметров адаптивного алгоритма, заложенного в блок управления и используемого в математической модели.
2. Определение вклада различных источников шума в общее звуковое поле агрегата для обоснования целесообразности использования предлагаемого технического решения.
3. Проверка адекватности разработанной методики определения эффективности применения ГШАТ.
4. Проведение сравнительной оценки трактора, оборудованного ГШАТ и СГШ, по уровням внешнего и внутреннего шума.
5. Проверка адекватности математической модели по определению аэродинамических потерь давления в глушителе шума и проведение сравнительных испытаний серийного и опытного образцов глушителей.

В соответствии с поставленными целями исследований была разработана программа экспериментальных работ:

1. Проведение лабораторных испытаний блока управления с эмуляцией режима работы глушителя с целью обоснования оптимальных параметров заложенного в него адаптивного алгоритма – количества весовых коэффициентов фильтра, величины фактора сходимости.

2. Проведение сравнительных тяговых испытаний трактора Беларус-1221, оборудованного прямоточным каналом, СГШ и ГШАТ, с целью обоснования наиболее интенсивного источника при использовании СГШ, проверки адекватности математической модели и оценки внешнего и внутреннего шумов трактора.

3. Проведение лабораторных испытаний по определению развиваемого прямоточным каналом, опытными и серийными образцами глушителей противодействия с целью оценки адекватности разработанной математической модели.

4. Проведение сравнительных полевых испытаний агрегата Беларус-1221+ПЛН-4-35 с целью подтверждения эффективности разработанного технического решения в реальных условиях эксплуатации.

5. Проведение лабораторных испытаний с целью тарировки тягового тензозвена и получения передаточных коэффициентов динамических микрофонов, используемых в тяговых и полевых испытаниях.

Лабораторные исследования выполнялись в лаборатории кафедры «Тракторы и автомобили» ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ» на подготовленных стендах, а также в шумозаглушенной звуковой студии, также принадлежащей вышеназванному университету. Тяговые испытания трактора проводились на учебном полигоне агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ». Полевые испытания проводились на полях ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ».

### **3.2 Объект испытания**

В качестве объекта экспериментальных исследований был выбран универсально-пропашной колесный трактор Минского тракторного завода с номинальным тяговым усилием 20кН в агрегате с плугом ПЛН-4-35. Сравнительному исследованию подвергался трактор с прямоточным каналом (трубой), ГШАТ и с серийной выпускной системой. В соответствии с результатами теоретических исследований для экспериментальных исследований была выбрана опытная конструкция ГШАТ, обладающая наиболее предпочтительными геометрическими параметрами с точки зрения эффективности.

На рисунке 17 изображен общий вид ГШАТ для автотракторных двигате-

лей. ГШАТ содержит корпус, состоящий из передней 5 и задней 6 частей, динамика 4, подвес которого защищен кольцевой пластиной, а алюминиевый диффузор покрывается тонким слоем полимерной пленки, устойчивой к воздействию высоких температур, располагающегося на опорной пластине 7 и снабженного кожухом 8, входного микрофона 1 и микрофона остаточного шума 3, а также блока управления 2.

ГШАТ работает следующим образом. Шум, генерируемый процессом выпуска газов из цилиндра, распространяется по выпускной системе и улавливается входным микрофоном 1. Данный сигнал, после усиления, оцифровывается и подается в блок управления 2. Аналогичные действия происходят с сигналом, получаемым от ошибочного микрофона 3, расположенного в непосредственной близости от ИАЗ 4. Данные сигналы используются для обновления вектора весовых коэффициентов адаптивного алгоритма, заложенного в блок управления 2. Свертка вектора исходного сигнала и обновленного вектора весовых коэффициентов дает обратный сигнал, генерируемый ИАЗ. В результате циклического выполнения алгоритма снижается уровень остаточного шума, фиксируемый микрофоном остаточного шума.

Эффект применения данного устройства достигается за счет снижения уровня шума в кабине оператора, что позволяет существенно снизить потери производительности труда операторов за счёт уменьшения утомляемости.

На рисунке 33 представлена рассматриваемая конструкция, установленная на трактор Беларус-1221.

Экспериментальные исследования состояли из следующих этапов: тарировка тензозвена, определение передаточных коэффициентов динамических микрофонов, лабораторные испытания на стенде для подбора подходящих параметров адаптивного алгоритма, заложенного в блок управления, лабораторные испытания по определению аэродинамических потерь, создаваемых полым каналом, серийным и опытным глушителем шума, сравнительные тяговые испытания и определение развиваемого противодавления трактора с полым каналом, серийным и

опытным глушителем шума и полевые испытания машинно-тракторного агрегата при вспашке стерни зерновых культур.



Рисунок 33 – ГШАТ, установленный на трактор «Беларус – 1221»

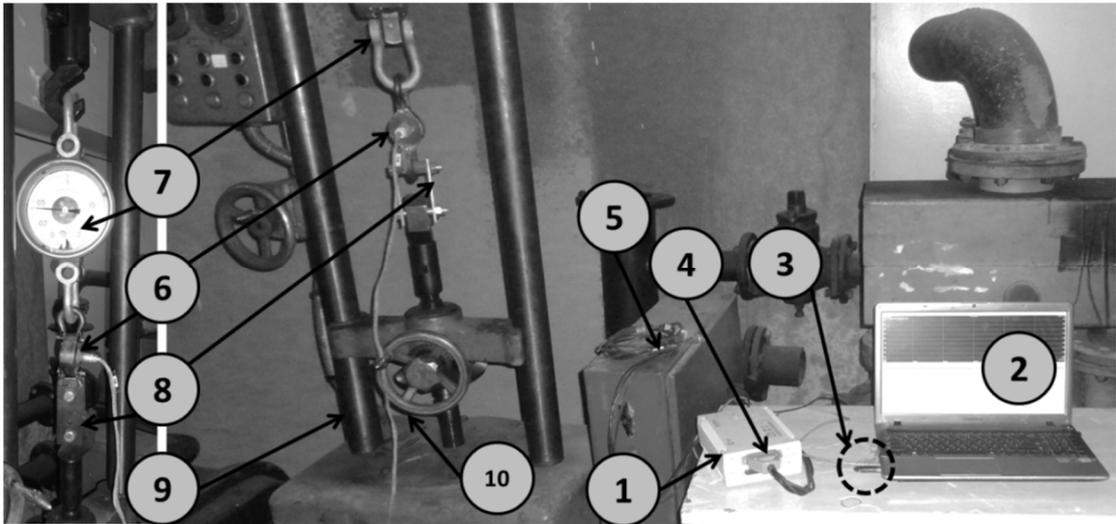
### **3.3 Методика проведения лабораторных испытаний**

Испытания включали в себя несколько независимых исследований:

1. Тарировка тягового тензозвена на универсальной разрывной машине.
2. Определение передаточных коэффициентов динамических микрофонов в специальной шумозаглушенной студии.
3. Испытание блока управления на стенде.
4. Сравнительные испытания по определению аэродинамических потерь, развиваемых полым каналом, серийным и опытным глушителем шума.

#### **3.3.1 Методика тарирования тягового тензозвена**

Предварительно перед проведением тяговых испытаний была произведена тарировка тягового звена в учебной лаборатории кафедры «Тракторы и автомобили» ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ (Рисунок 34).



1 – крейт LTR-EU-2, оснащенный тензомодулем LTR-212; 2 – ПК; 3 – электронный ключ для работы программного обеспечения АСТест; 4 – разъём для соединения с тензомодулем датчиков; 5 – неиспользуемые выходы многоканального кабеля; 6 – тензозвено; 7 – образцовый динамометр ДПУ-2-2; 8 – скоба; 9 – универсальная разрывная машина; 10 – маховик.

Рисунок 34 – Оборудование для тарировки тягового звена

Тарировка тензозвена 6 заключалась в его ступенчатом нагружении разрывной силой, создаваемой вращением маховика 10 универсальной разрывной машины 9, и фиксации соответствующего нагрузке значения разбалансировки моста тензозвена, которое определяется моделем крейта 1 и записывается в файл испытания на персональный компьютер 2. Нагрузка изменялась ступенчато от 0 до 20кН и обратно, с шагом 100Н. Опыт проводился с тремя повторностями.

Результатом испытания является график зависимости нагружающей силы от напряжения разбалансировки тензомоста и таблица результатов, по которым, используя стандартные методики, были подобраны коэффициенты полинома первой степени, позволяющие аналитически описать обозначенные зависимости. При определении коэффициентов был использован метод наименьших квадратов

$$\begin{cases} a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + n \cdot b = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}, \quad (40)$$

где  $x_i$  – значение напряжения разбалансировки тензомоста на  $i$ -м нагружении, мВ;

$y_i$  – значение прикладываемой нагрузки на  $i$ -м нагружении, Н;

$n$  – число опытных точек;

$a, b$  – отыскиваемые коэффициенты полинома первой степени.

Решая представленную систему уравнений одним из широко известных способов получаем коэффициенты  $a$  и  $b$ , позволяющие аналитически описать зависимость силы на крюке  $P_{кр}$ , от напряжения тензомоста  $U$

$$P_{кр}(U) = a \cdot U + b \quad (41)$$

Полученные коэффициенты использовались при создании расчетного канала в программном обеспечении АС Test Composer, благодаря которому, в процессе тяговых испытаний, стало возможно отображение сигнала крюкового усилия непосредственно в единицах силы – ньютонах.

### 3.3.2 Методика определения передаточных коэффициентов динамических микрофонов

Для анализа частотной характеристики какого-либо единственного источника звука достаточно использование единственного шумомера. Если необходимо одновременно проанализировать частотные спектры нескольких источников для определения каких-либо взаимосвязей, нужно иметь многоканальный шумомер или несколько моноканальных. При этом отсутствует возможность корреляционного анализа временных характеристик сигналов источников, т.к. в большинстве случаев шумомеры не имеют возможности производить запись данных характеристик.

Поэтому, с целью получения временных характеристик нескольких источников звуковых сигналов одновременно, было принято решение об использовании качественных динамических микрофонов.

Обладая записью значений амплитуд сигналов во времени и используя достаточно простой математический аппарат, можно перейти к узкополосному, третьоктавному и октавным спектрам шумов. Но так как и микрофоны, и измери-

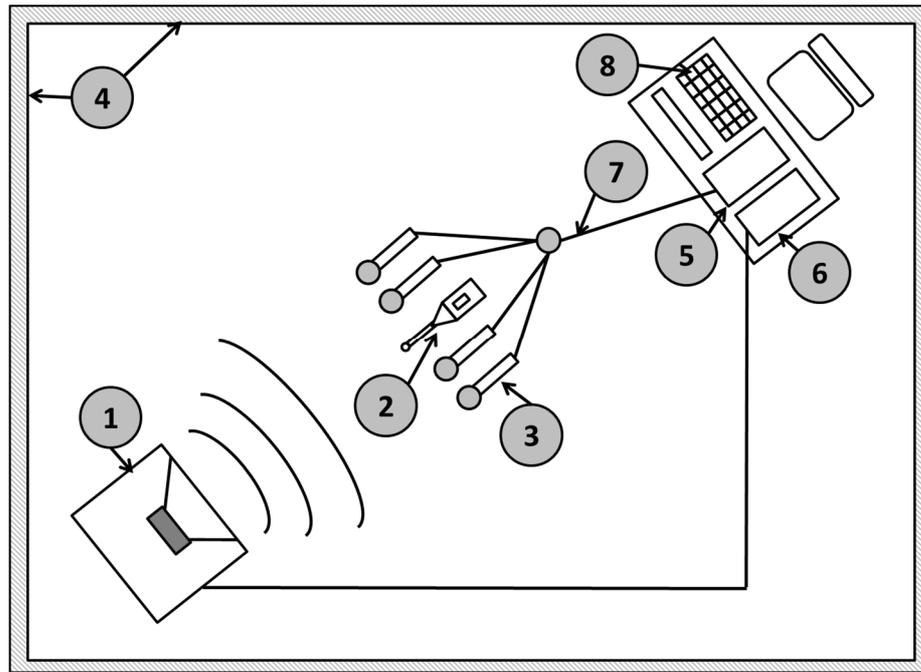
тельный тракт обладают определенными амплитудно-частотными характеристиками, из-за которых некоторые частоты в спектре сигнала могут гаситься, а некоторые усиливаться, необходимо провести определение коэффициентов, которые позволят от некоторого файла, содержащего запись исследуемого звука, перейти к его действительному октавному спектру, как если бы был использован стандартный шумомер.

При этом также появляется возможность корреляционного анализа записанных звуковых сигналов и, следовательно, определения степени взаимосвязанности шума в одних точках пространства с шумом в других точках.

Для определения данных поправочных коэффициентов была использована методика, согласно которой необходимо оборудование, представленное на рисунке 35.

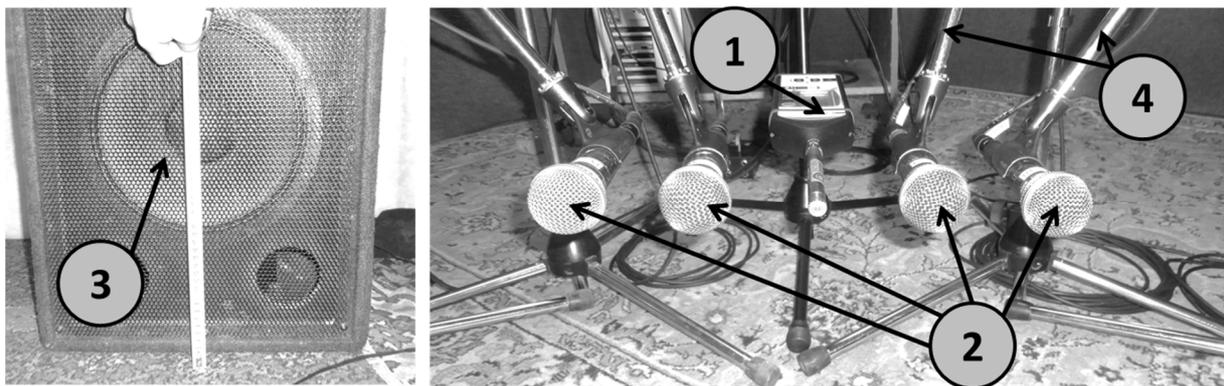
В качестве источника звука был использован активный монитор Yegasow AAC-100R, мощностью 100 Вт. Микрофоны были установлены в микрофонных стойках на высоте центральной оси динамика источника звука (~31см). Кроме этого, в центре между микрофонами был установлен прецизионный шумомер «Октава-110А» (Рисунок 36). Взаимное расположение всех элементов схемы представлено на рисунке 37.

При проведении исследований источником звука создавался тональный шум известной амплитуды, значение которой отображалось шумомером. Генератором синусоидальных сигналов с разными частотами и постоянной амплитудой служит персональный компьютер 7 с программным обеспечением Cool Edit Pro. Так как источник звука имеет свои нелинейности в амплитудно-частотной характеристике с провалами на некоторых частотах, необходимо производить усиление/ослабление поступающего к нему сигнала. Это позволяет сделать дополнительный микшерный пульт 5, расположенный вблизи места управления процессом записи.



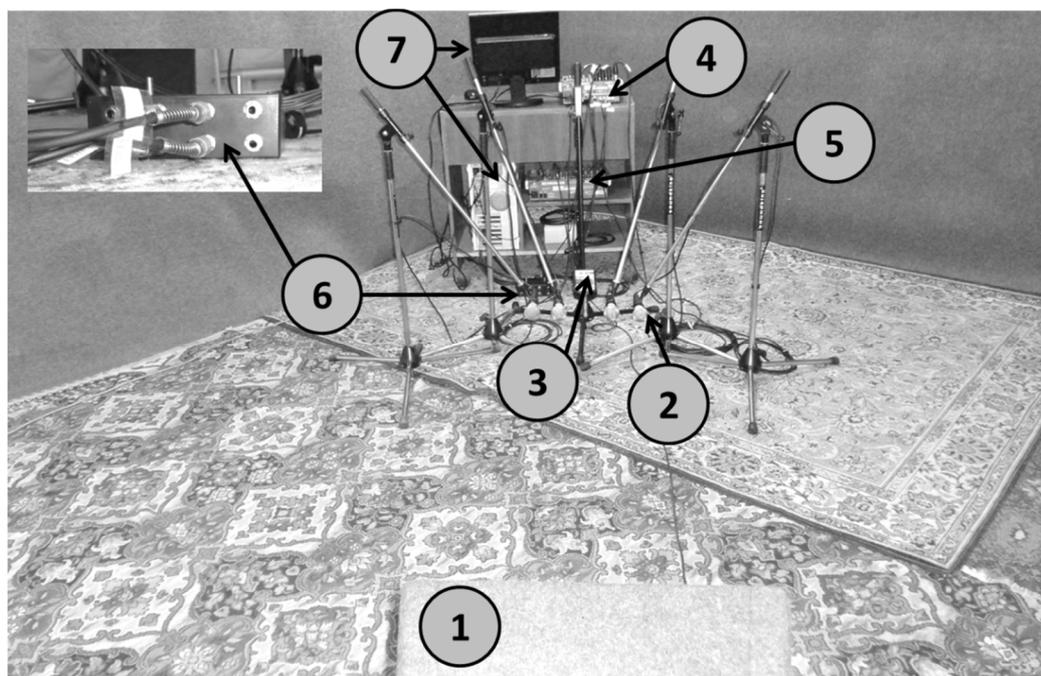
1 – источник образцового звукового сигнала; 2 – образцовый шумомер; 3 – динамические микрофоны; 4 – шумозаглушенные стены студии; 5 – микшерный пульт для записи сигналов с динамических микрофонов; 6 – микшерный пульт для усиления уровня сигнала источника 1; 7 – экранированные провода; 8 – ПК, оборудованный аудиокартой для многоканальной записи.

Рисунок 35 – Схема для определения поправочных коэффициентов динамических микрофонов



1 – шумомер Октава-110А; 2 – динамические микрофоны; 3 – источник звука;  
4 – микрофонные стойки.

Рисунок 36 – Расположение микрофонов и динамика источника звука



1 – источник звука; 2 – динамические микрофоны с микрофонными стойками; 3 – шумомер «Октава-110А»; 4 – микшерный пульт для усиления сигналов от динамических микрофонов; 5 – микшерный пульт для усиления/ослабления сигнала, подводимого к источнику звука; 6 – изготовленный короб для аудиокарты многоканальной записи; 7 – ПК для записи и сохранения результата.

Рисунок 37 – Взаимное расположение всех элементов для определения передаточных коэффициентов динамических микрофонов

Одновременно с генерацией звука используемое оборудование позволяет производить многоканальную запись звуковых сигналов с динамических микрофонов (до 8 каналов). Частота дискретизации АЦП во время опыта была выбрана стандартной 44,1 кГц, что позволяет различить в записываемом файле весь диапазон звуковых частот. Разрядность квантования сигнала была выбрана максимальной для данной аудиокарты – 24 бит. При записи степень заполнения сигналом динамического диапазона аудиокарты от каждого микрофона, а также форма сигналов в реальном времени отображалась на мониторе компьютера.

Предварительно, перед испытаниями был определен максимальный коэффициент предусиления сигнала, регулируемый на микшерном пульте для усиления записываемых сигналов 4 вращением ручки GAIN для каждого канала. Положение основных фейдеров пульта (регуляторов ползункового типа) устанавлива-

лось на значение 0 дБ. Это осуществлялось для того, чтобы не позволить амплитуде усиленного сигнала превысить динамический диапазон звуковой карты компьютера, что приведет к потере результатов опыта.

Для этого источником 1 генерировался звуковой сигнал с УЗД 120 дБ (выбранным в качестве предельного) последовательно на частотах, соответствующих среднегеометрическим частотам различных октавных полос от 63 до 16 000 Гц. При этом фиксировался отклик записывающей системы. Источник звука генерировал тональные сигналы последовательно на частотах 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 и 16 000 Гц. Создание столь амплитудного сигнала на низшей среднегеометрической частоте звукового диапазона – 31,5 Гц оказалось невозможным в силу недостатков источника звука.

При этом визуально фиксировалась степень заполнения динамического диапазона сигналом. Согласно результатам исследований наибольший отклик для всех микрофонов обеспечивался на частоте 4000 Гц (что объясняется вокальным предназначением данных микрофонов). Поэтому именно на данной частоте при амплитуде сигнала 120 дБ, вращением регулятора GAIN были установлены такие значения коэффициентов усиления, которые обеспечили заполнение сигналом динамического диапазона  $\sim 2/3$ . После этого положение всех влияющих на усиление регуляторов на микшерном пульте записи было зафиксировано для всех проводимых далее экспериментов.

Основной процесс определения коэффициентов микрофонов выполнялся по следующему алгоритму:

1. Задавалась анализируемая октавная полоса частот и, с помощью программного обеспечения, создавался звуковой файл, содержащий запись синусоидального сигнала со среднегеометрической частотой рассматриваемой октавной полосы. Например, для октавной полосы от 45 до 90 Гц создавался звуковой файл с частотой 63 Гц.

2. Далее данный файл проигрывался, при этом, изменяя положение фейдера на микшерном пульте 5 (рисунок 37) и наблюдая за показаниями шумомера 3, устанавливались показания УЗД на данной полосе частот, равными 60 дБ.

3. После этого осуществлялась запись сигналов со всех микрофонов длительностью не менее 45 секунд, и их сохранение в файлы на жесткие диски ПК с понятными однозначными именами.

4. Далее пункты 2 и 3 повторялись с установлением УЗД сигналов последовательно от 70 до 120 дБ, с шагом 10 дБ.

5. Далее изменялась рассматриваемая полоса частот, заново генерировался файл и выполнялись пункты алгоритма 3, 4 и 5. Создаваемые файлы имели следующие частоты – 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 и 16000 Гц.

6. Последним шагом была сортировка и математическая обработка полученных файлов.

Математическая обработка включала следующие этапы:

1. Выбор анализируемой октавной полосы частот, например от 355 до 710 Гц. Следовательно, исследуются все файлы, записанные при генерации среднегеометрической частоты данной полосы, в данном случае – 500 Гц.

2. Выбор первого файла для анализа, характеризуемого определенным УЗД, задаваемым при проведении записи. Например – 110 дБ.

3. Выбор участка звукового файла, характеризуемого стабильностью амплитуды синусоиды и преобразование 1024 точек указанного участка из \*.wav формата в \*.bin.

4. Получение узкополосного спектра преобразованного участка звукового файла по 1024 точкам с шириной полосы ~22 Гц и сохранение данного вектора в \*.txt файл. Внешний вид полученного спектра записанного сигнала с УЗД 110 дБ и частотой 500 Гц представлен на рисунке 38. Следует заметить, что вертикальная шкала не имеет размерности, горизонтальная – единицы частоты – герцы.

При получении узкополосного спектра используется ДПФ

$$SPECTR_k = \sum_{j=0}^{1023} SIGNAL_j \cdot e^{-\frac{\pi \cdot i}{512} \cdot k \cdot j}, k \in 0 \dots 1023 \quad (42)$$

где  $SIGNAL_j$  – j-е значение амплитуды записанного сигнала, получаемое из преобразованного файла;

$SPECTR_k$  – значение амплитуды  $k$ -й гармоники в спектре сигнала.

5. Далее определяется октавный спектр полученного сигнала

$$OCTAVE_F = 10 \cdot \lg \left[ \sum_{j=1}^m (SPECTR_{a+j})^2 \right], F \in 1 \dots B, \quad (43)$$

где  $B$  – число исследуемых октавных полос частот;

$a$  – некоторый индекс вектора амплитуд узкополосного спектра, которому соответствует минимальная частота, находящаяся в границах октавной полосы с номером  $F$ ;

$m$  – число полос спектра, находящихся в границах октавной полосы с номером  $F$ .

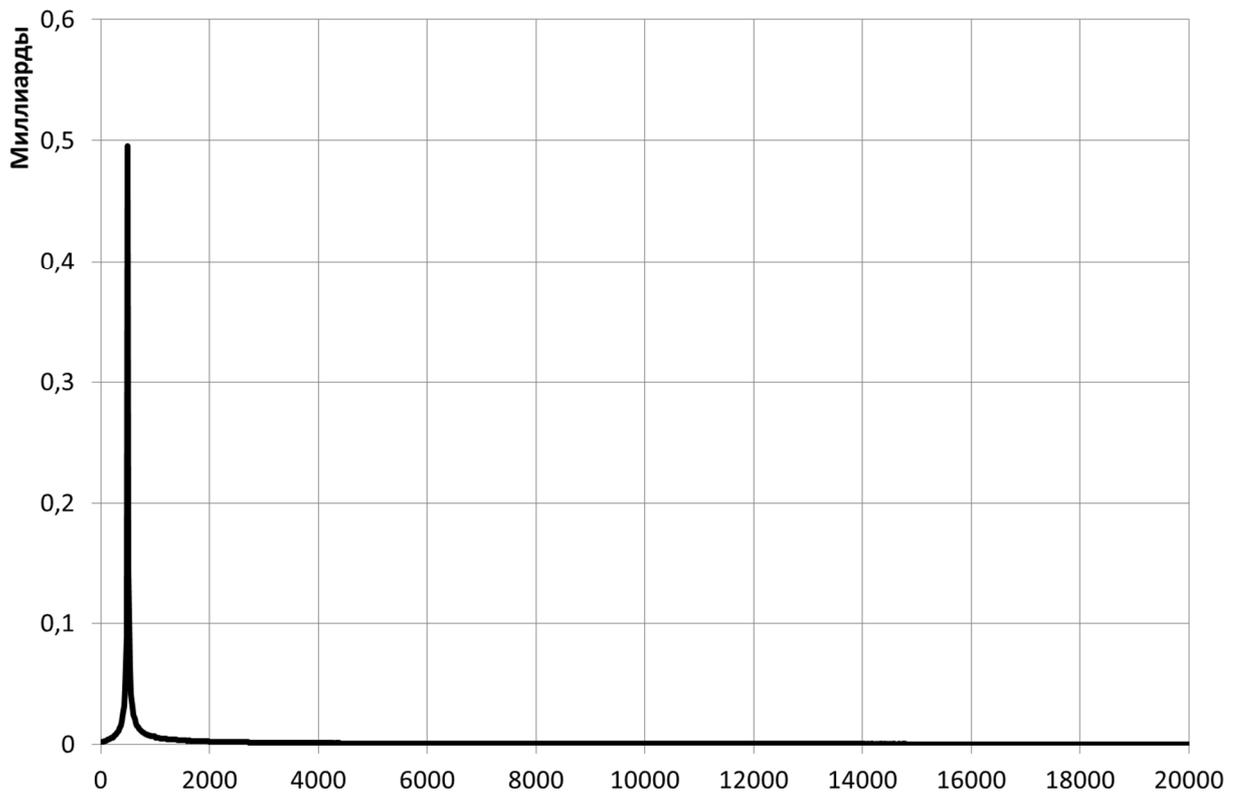


Рисунок 38 – Узкополосный спектр сигнала с УЗД 110 дБ и частотой 500 Гц

6. После этого определяем поправочный коэффициент, полученный для данной частоты при данном УЗД

$$\Delta_{ЧАСТОТА}^{УЗД} = OCTAVE_F - УЗД, \quad (44)$$

где УЗД – уровень звукового давления, установленный при записи файла, дБ.

В нашем случае, так как значение, которое принял октавный спектр для рассматриваемой полосы частот  $OCTAVE_5 = 181$  дБ, получаем:

$$\Delta_{500}^{110} = 181 - 110 = 71 \text{ дБ}$$

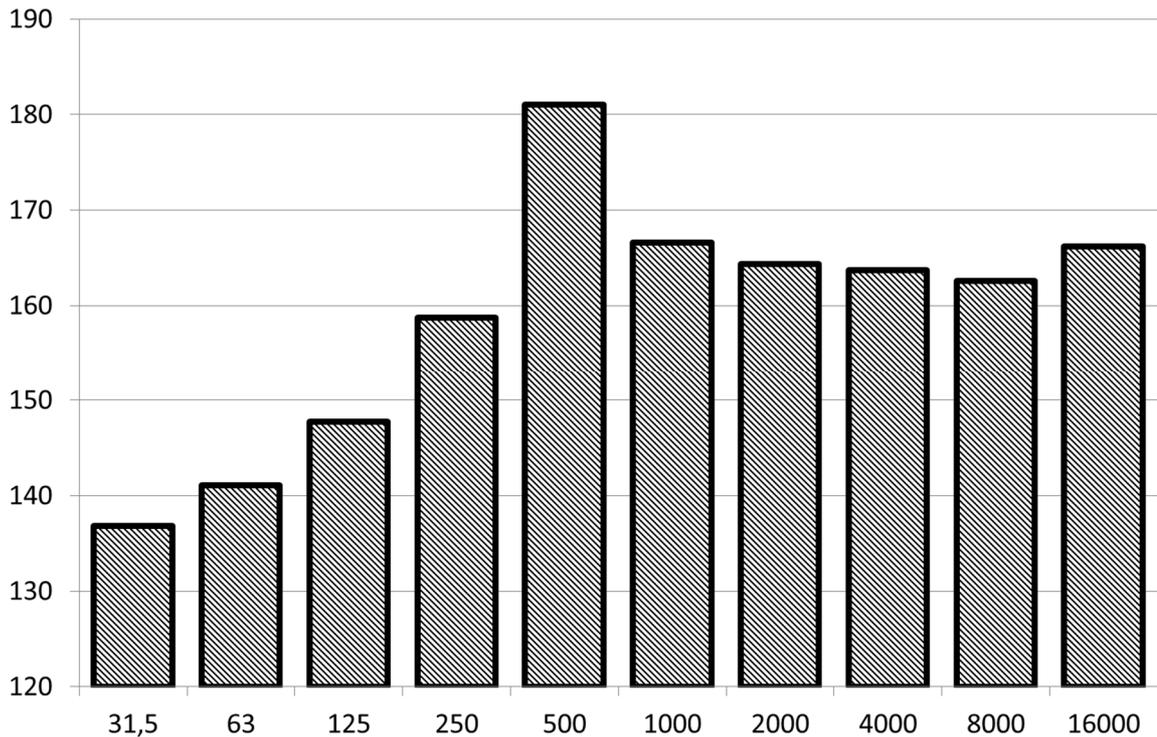


Рисунок 39 – Октавный спектр сигнала с УЗД 110 дБ и частотой 500 Гц

7. После этого производится математическая обработка оставшихся файлов, соответствующих другим УЗД, по пунктам 3, 4, 5 и 6. В результате получаем 5 поправочных коэффициентов для рассматриваемой октавной полосы частот.

8. Производим статистическую обработку полученных коэффициентов и выясняем:

- среднее значение

$$\Delta_{ЧАСТОТА}^{CP} = \frac{\sum \Delta_{ЧАСТОТА}^{УЗД}}{5} \quad (45)$$

- дисперсию

$$D_{ЧАСТОТА} = \frac{\sum (\Delta_{ЧАСТОТА}^{CP} - \Delta_{ЧАСТОТА}^{УЗД})^2}{5} \quad (46)$$

- среднеквадратическую дисперсию

$$\sigma_{ЧАСТОТА} = \sqrt{D_{ЧАСТОТА}} \quad (47)$$

- коэффициент вариации

$$v = \frac{\sigma_{\text{ЧАСТОТА}}}{\Delta_{\text{ЧАСТОТА}}^{CP}} \quad (48)$$

9. Повторяем выполнение пунктов 2-8 для оставшихся октавных полос частот.

Преобразование файлов и определение узкополосного спектра по пунктам 1-3 алгоритма осуществлялось с помощью специально написанной программы с использованием языка Си в программном обеспечении Microsoft Visual C++ Express 2010. Листинги использованных алгоритмов приведены в приложениях В, Г и Д. Математические операции по оставшимся пунктам алгоритма выполнялись с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2010.

Результатом выполнения представленного алгоритма является таблица поправочных коэффициентов для всех октавных полос звуковых частот, которая позволяет от записанного при тех же условиях, что и при эксперименте, звукового файла перейти к его октавному спектру.

### **3.3.3 Методика лабораторных исследований эффективности блока управления**

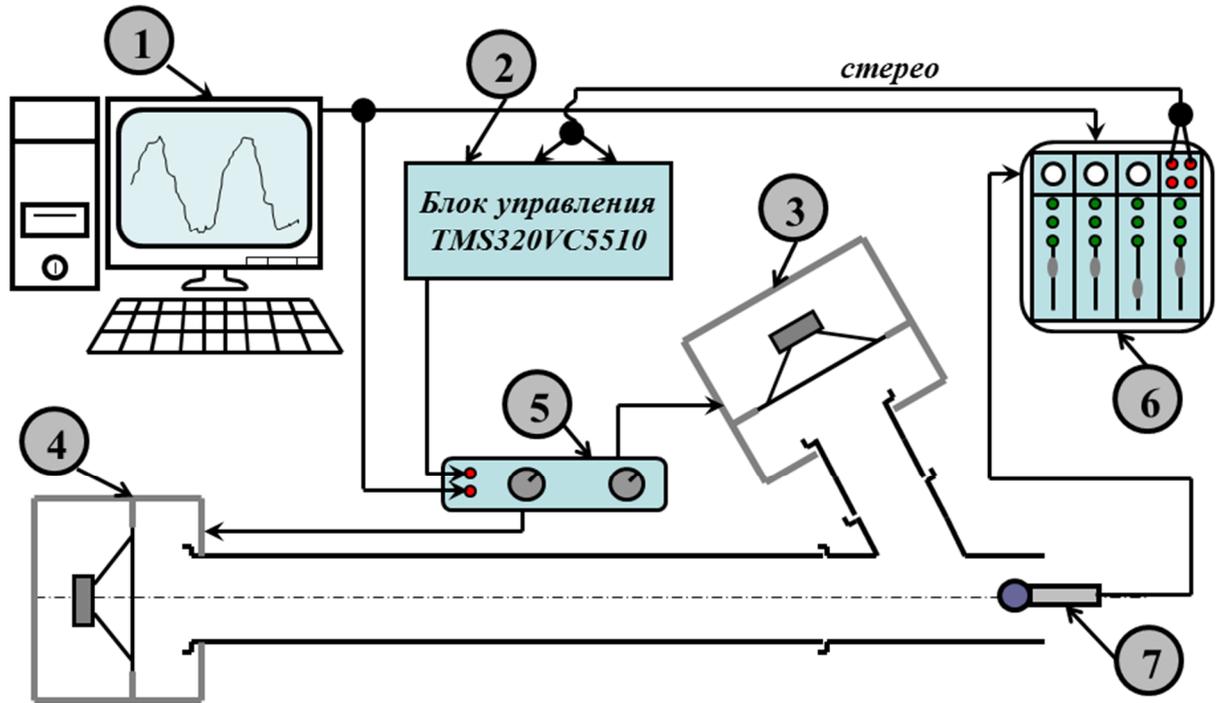
В процессе лабораторных испытаний блока управления производилась:

- регистрация уровней звука на выходе из испытательного канала;
- запись сигнала остаточного шума;
- запись входного сигнала.

Данные параметры контролировались визуально и записывались во внутреннюю память шумомера «Октава-110А» и персонального компьютера. Схема стенда, используемого при проведении лабораторных испытаний, представлена на рисунке 40.

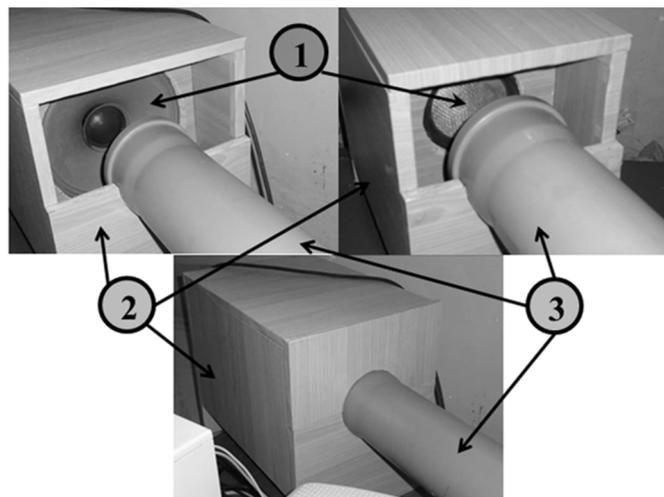
В качестве источника основного шума, а также ИАЗ использовались динамические громкоговорители в специально изготовленных корпусах (Рисунок 41). Звук, генерируемый данными источниками 3, 4, определялся сигналом, отправляемым аудиокартой компьютера 1 через усилитель 5. В качестве каналов распространения звука использовались пластиковые трубы диаметром 110 мм. Концы

труб плотно фиксировались верхними фронтальными крышками корпусов источников, что снижало вероятность распространения акустических волн от источников до микрофона через внешнее пространство.



1 – персональный компьютер с аудиокартой; 2 – блок управления; 3 – ИАЗ;  
4 – первичный источник шума; 5 – стереоусилитель звуковых частот; 6 –  
микшерный пульт; 7 – конденсаторный микрофон.

Рисунок 40 – Схема лабораторного стенда для анализа эффективности адаптивно-го блока управления

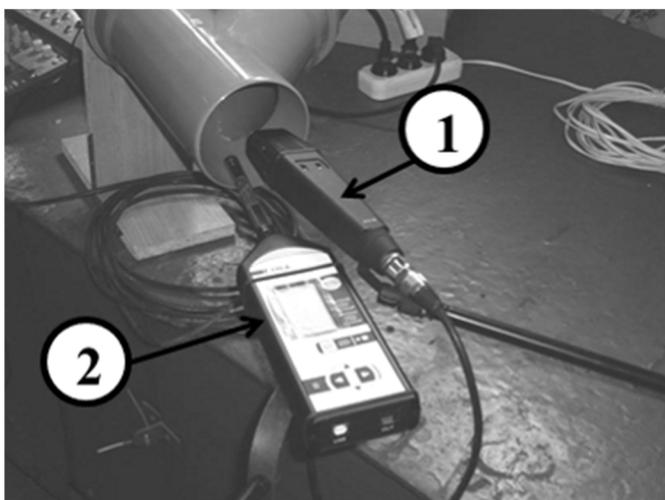


1 – громкоговорители; 2 – корпус источников; 3 – каналы распространения.

Рисунок 41 – Первичный источник и ИАЗ

С целью снижения вероятности возникновения обратной связи, т.е. улавливания справочным микрофоном сигнала вторичного источника, этот датчик не использовался, а его сигнал был заменен сигналом, отсылаемым на основной источник 3 аудиокартой компьютера, который предварительно был усилен микшерным пультом 6.

В качестве датчика ошибки использовался высококачественный конденсаторный микрофон фирмы «Октава» МК-219, внешний вид которого представлен на рисунке 42. Кроме этого, на рисунке представлен прецизионный шумомер Октава-110А, размещенный вблизи микрофона. При испытаниях он фиксировал уровни звука до и после включения САШ.



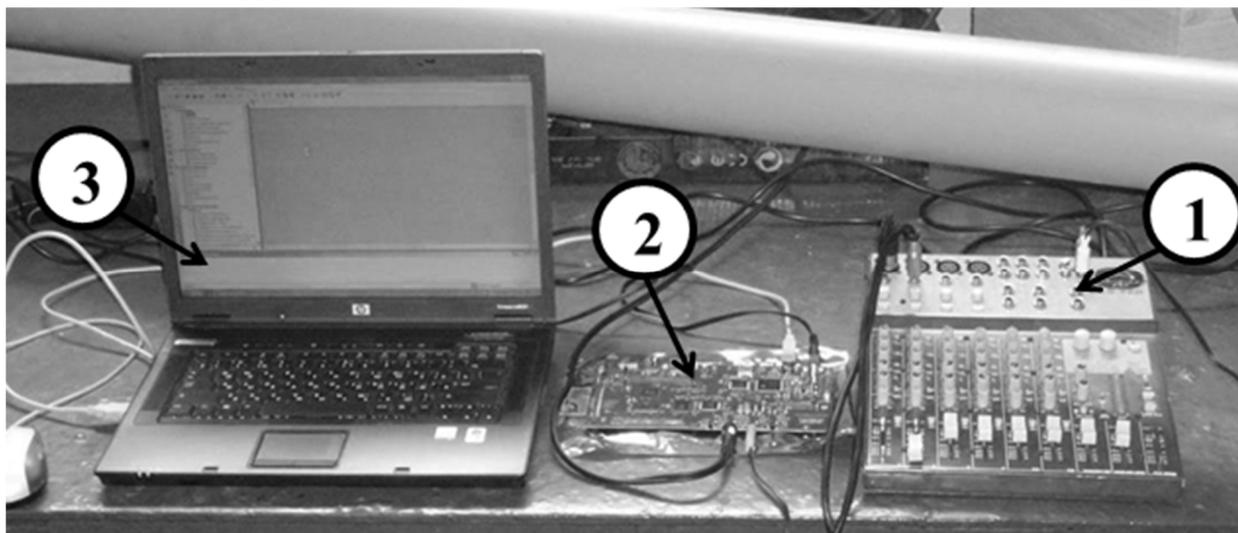
1 – микрофон МК-219; 2 – прецизионный шумомер «Октава-110А»

Рисунок 42 – Фиксаторы временных и частотных характеристик остаточного шума

В качестве предусилителя справочного и ошибочного сигналов использовался студийный 4-канальный микшерный пульт Behringer 804. Внешний вид указанного устройства представлен на рисунке 43.

Блок управления был представлен отладочным модулем TMSDSK5510 фирмы Texas Instruments, оснащенным процессором цифровой обработки сигналов с фиксированной точкой TMS320VC5510 с рабочей частотой 200 МГц и кодеком АІС23 (АЦП+ЦАП). Для возможности отладки алгоритма управления и оперативного изменения его параметров блок управления был соединен USB кабелем с ноутбуком SAMSUNG, на котором была установлена интегрированная среда

разработки Code Composer Studio. Внешний вид отладочного модуля и ноутбука представлен на рисунке 43.



1 – 4-х канальный студийный микшерный пульт Behringer 804; 2 – отладочный модуль TMSDSK5510; 3 – ноутбук SAMSUNG.

Рисунок 43 – Фиксаторы характеристик остаточного шума

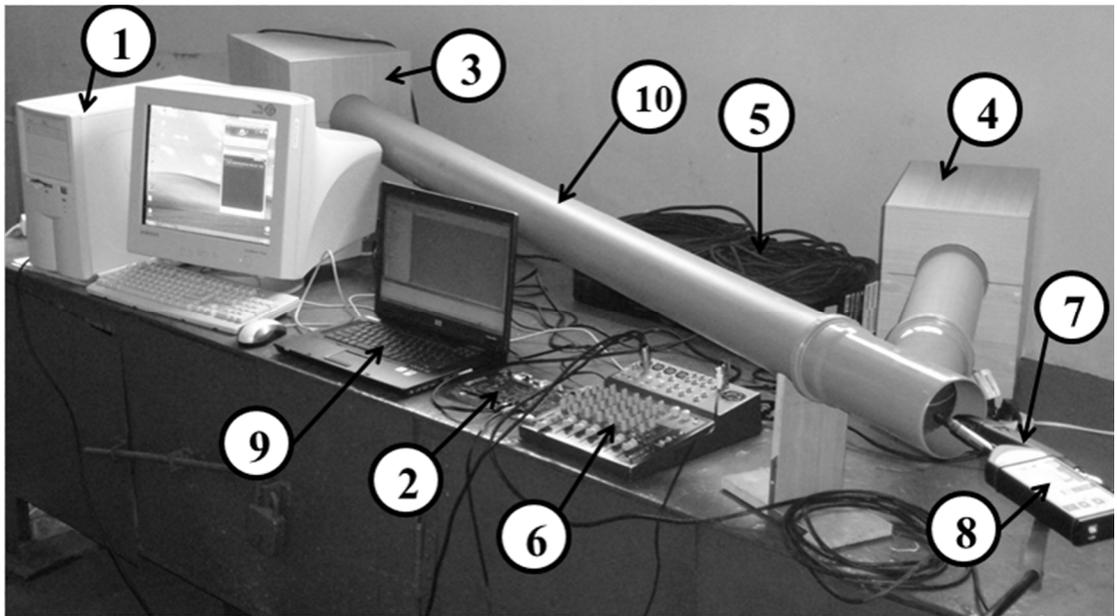
Общий вид стенда для испытаний параметров блока управления представлен на рисунке 44.

Лабораторные испытания начинались с создания программного кода, который будет исполняться блоком управления САШ. Перед проведением испытаний код каждый раз изменялся, при этом производились наблюдения за изменением эффекта шумоподавления.

Изменениям в коде подвергались только те параметры, которые могут влиять на эффективность алгоритма:

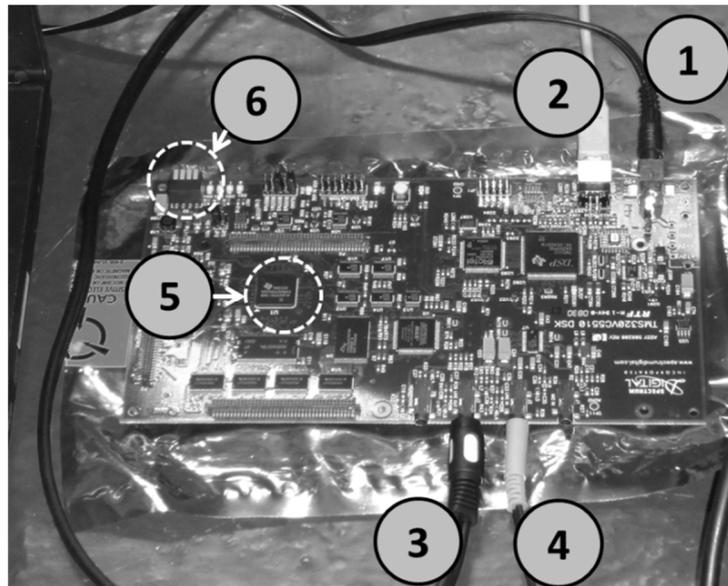
- число весовых коэффициентов;
- фактор сходимости;
- тип адаптивного алгоритма.

После изменения программного кода с помощью интегрированной среды разработки Code Composer Studio v.3 производилась его компиляция и загрузка во flash память процессора TMS320VC5510 отладочной платы. После этого блок управления выполнял замкнутый цикл, не выполняя никаких команд, ожидая прерывания от включения тумблера, расположенного на плате (Рисунок 45).



1 – персональный компьютер; 2 – блок управления; 3 – первичный источник шума; 4 – ИАЗ; 5 – стереоусилитель звуковых частот; 6 –микшерный пульт; 7 – конденсаторный микрофон; 8 – шумомер; 9 – ноутбук; 10 – акустический канал.

Рисунок 44 –Лабораторный стенд для анализа эффективности адаптивного БУ



1 – подключение питания – 12В; 2 – USB соединение с ПК; 3 – подвод сигнала от входного и ошибочного микрофонов к АЦП платы; 4 – отвод сигнала к усилителю от ЦАП платы; 5 – процессор TMS320VC5510; 6 – блок тумблеров.

Рисунок 45 – Отладочный модуль TMSDSK5510 Starter Kit

Кроме этого, изменялся тип звука, генерируемого первичным источником. Первоначально были исследованы периодические типы сигналов с различной формой волны: синусоидальной, треугольной, сложной и прямоугольной формы.

Различные типы звукового сигнала генерировались аудиокартой ПК, используя программное обеспечение Cool Edit Pro. Частота генерируемого сигнала для всех испытаний поддерживалась постоянной – 125Гц. Выбранное значение частоты обусловлено основной тоникой, возбуждаемой при работе двигателя Д-260 на номинальных оборотах.

Кроме простых периодических сигналов исследовалась способность алгоритма снижать шум процесса выпуска ОГ трактора Беларусь-1221, предварительно записанный на открытой площадке без отражающих стен. Данный звуковой файл был записан при неподвижном состоянии трактора и колебаниях частоты работы двигателя вблизи номинала, которые создавались водителем педалью подачи топлива. Работа алгоритма при снижении данного шума должна показать его эффективность при эксплуатации в условиях приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Далее данные звуковые сигналы подвергались усилению до уровня 90 дБ, что фиксировалось третьоктавным спектром, получаемым с помощью шумомера «Октава-110А», расположенного на выходе канала. После этого коэффициент усиления фиксировался.

Нажатием на тумблер на отладочной плате, используемой в качестве блока управления, включался в работу заложенный адаптивный алгоритм с заданными параметрами. При анализе использовались три типа адаптивных алгоритмов, которые были выбраны в качестве наиболее употребляемых после анализа литературных источников [91, 124, 125, 126]: наименьших средних квадратов (LMS), алгоритм с оффлайн идентификацией вторичного пути (FxLMS) и алгоритм с утечками (leaky-LMS).

При этом одновременно с воспроизведением производилась запись сигнала с конденсаторного микрофона «Октава МК-219», расположенного на выходе из

акустического канала. Для этого использовался тот же программный продукт Cool Edit Pro.

Если происходило схождение адаптивного фильтра, и звук снижался до некоторых фиксированных значений, производилась запись третьооктавного спектра сигнала шумомером. Если происходила разбалансировка адаптивного фильтра, звук усиливался и становился нестационарным, опыт признавался неудачным, и его прекращали без записи спектра.

Каждый опыт проводился с тоекратным повторением. После проведения лабораторных исследований производился анализ полученных результатов, и подбирались наиболее предпочтительные параметры адаптивного алгоритма.

Для проведения подобного рода быстрых и незатратных экспериментов не было необходимости в использовании методик планирования эксперимента.

Все изменяемые значения и величины, которые они принимали, представлены на рисунке 46.

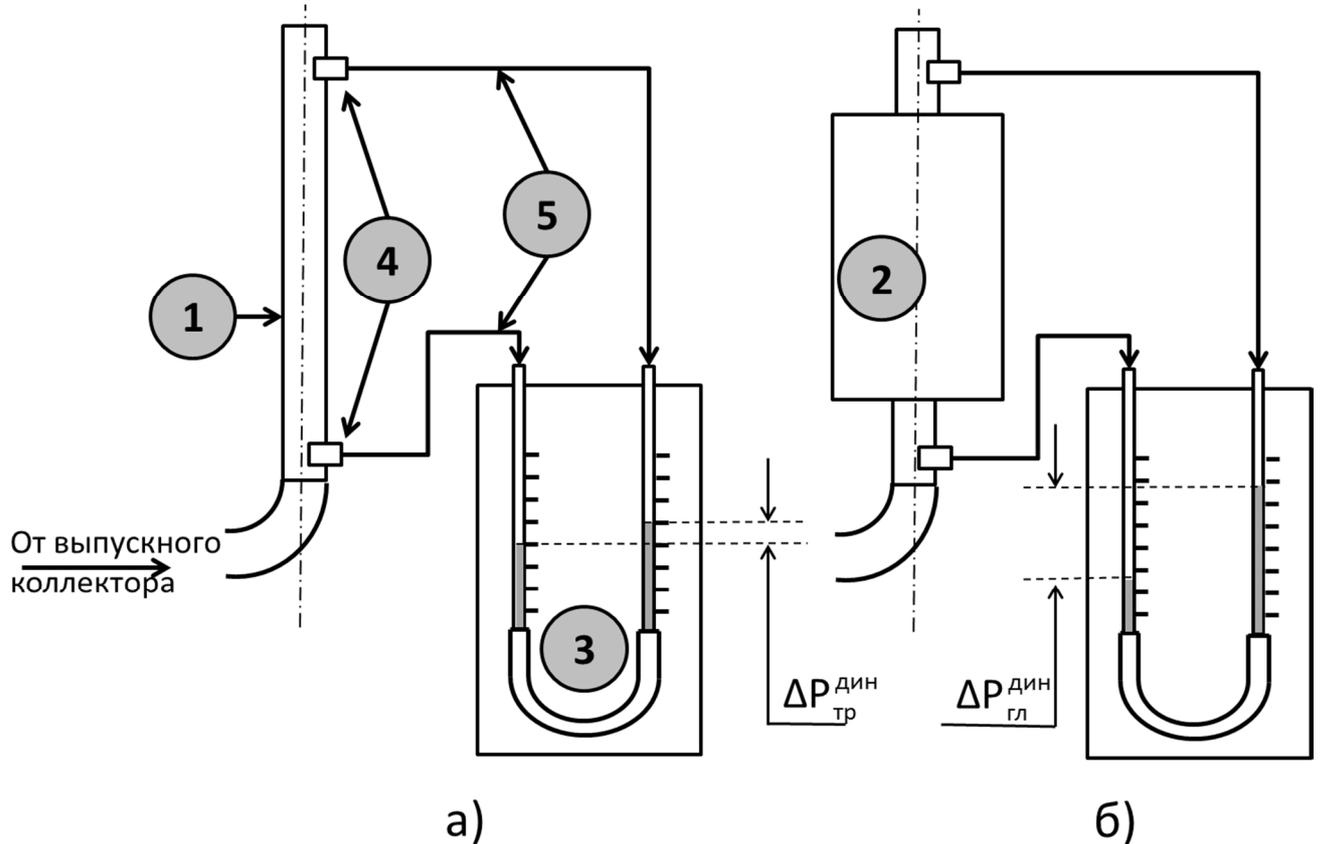


Рисунок 46 – Изменяемые значения и величины при проведении лабораторных испытаний

### 3.3.4 Методика определения аэродинамического сопротивления, развиваемого глушителем

Любые глушители создают определенное сопротивление движению рабочей среды, характеризуемое потерей давления. Эти потери давления называются противодавлением и измеряются в паскалях, миллиметрах водного столба или процентах.

Измерения противодействия выполняются при помощи U-образного манометра, заполненного дистиллированной водой (Рисунок 47). Противодействие измеряется на участке прямой трубы на расстоянии не ближе 150 мм к расширению, на удалении от колена выпускной трубы достаточном для того, чтобы устоялся поток выходящих газов [37, 43].



а – определение потерь давления полый трубы; б – определение потерь давления, вносимых глушителем шума; 1 – полый канал; 2 – глушитель шума;

3 – U-образный манометр; 4 – штуцеры; 5 – соединительные резиновые трубки.

Рисунок 47 – Стенд для определения противодействия, развиваемого глушителем

В выпускной трубе просверливаются отверстия, перпендикулярные к поверхности трубы без образования внутренних заусенцев. Глубина отверстия должна не более чем в 3 раза превышать диаметр отверстия. Внутренний диаметр штуцера, приваренного к отверстию, должен быть в пределах 2-2,5 диаметра отверстия.

При помощи резинового шланга отверстие соединяется с U-образным манометром, заполненным дистиллированной водой [37].

Вычисление противодавления осуществляется при полностью прогревом двигателе с температурой охлаждающей жидкости не менее 85 °С.

Алгоритм вычисления средних потерь давления для полого канала, серийного и опытного глушителей шума:

1. Собрать установку по схеме, представленной на рисунке 47а.
2. Установить частоту работы двигателя 900 об/мин.
3. Произвести замер потерь давления  $\Delta P_{тр}$  производимых полым акустическим каналом в мм. водного столба. Произвести преобразование полученного результата в паскали по формуле

$$\Delta P_{ТР}^{ДИН} = 9,807 \cdot \Delta P_{ТР} \quad (49)$$

4. Изменить частоту работы двигателя последовательно на 1200, 1500, 1800, а затем 2100 об/мин и повторить замер по пункту 3. Результаты всех измерений записывать в журнал испытаний.

5. Собрать установку по схеме, представленной на рисунке 47б, сначала используя СГШ, затем – ГШАТ, и повторить шаги алгоритма с 2-го по 4-й.

6. Произвести математическую обработку полученных результатов по формулам, аналогичным (45)-(48).

7. Вычислить относительное противодавление, развиваемое серийным и опытным образцом глушителей шума, относительно полого канала

$$\xi = \frac{\Delta P_{ГЛ}^{ДИН}}{\Delta P_{ТР}^{ДИН}} \cdot 100\% \quad (50)$$

### 3.4 Методика проведения тяговых и полевых испытаний

Для анализа влияния основных источников шума на характеристики внешнего шума и шума на рабочем месте существует два метода [60, 80]:

- метод последовательного исключения источников;
- метод определения взаимной корреляции акустических сигналов.

В первом случае влияние источника оценивается по изменению уровней звукового давления после его исключения – забор воздуха и отвод газов через трубопроводы, отключение вентилятора, работа на тормозном стенде с загрузкой двигателя через вал отбора мощности и работа трактора с той же загрузкой двигателя в движении. Этот метод весьма сложен и требует значительных затрат.

Во втором случае количественная связь между сигналом источника и шумом в интересующей точке звукового поля оценивается по значениям нормированной функции взаимной корреляции обоих сигналов [80]:

$$\rho_{xy} = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0) \cdot R_{yy}(0)}}, \quad (51)$$

где  $R_{xy}(\tau)$  – функция взаимной корреляции двух сигналов;

$R_{xx}(0)$ ,  $R_{yy}(0)$  – значения автокорреляционных функций для двух сигналов при  $\tau = 0$ .

Функция взаимной корреляции определяется из следующего уравнения:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f_x(t) \cdot f_y(t + \tau) \cdot dt, \quad (52)$$

где  $f_x(t)$ ,  $f_y(t)$  – два исследуемых на сходство сигнала.

Функция взаимной корреляции показывает сходство или различие двух сигналов. Если источник полностью определяет шум в точке, то нормированная функция взаимной корреляции имеет максимум, равный единице [87].

Автокорреляционная функция используется для определения степени схожести сигнала на свою копию, сдвинутую во времени на величину  $\tau$ . То есть с помощью данной функции можно определить, является ли сигнал периодическим.

Автокорреляционная функция определяется из следующей зависимости:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f_x(t) \cdot f_x(t + \tau) \cdot dt \quad (53)$$

Нормированная автокорреляционная функция определяется по аналогии с нормированной функцией взаимной корреляции

$$\rho_{xx} = \frac{R_{xx}(\tau)}{R_{xx}(0)} \quad (54)$$

Метод определения взаимной корреляции двух сигналов достаточно прост и эффективен.

Этот метод был использован при нахождении основного источника шума, определяющего как внешнее, так и внутреннее звуковое поле трактора «Беларус – 1221» Минского тракторного завода. Кроме этого целью тяговых испытаний являлось определение адекватности предлагаемой математической модели.

При проведении тяговых испытаний производилась:

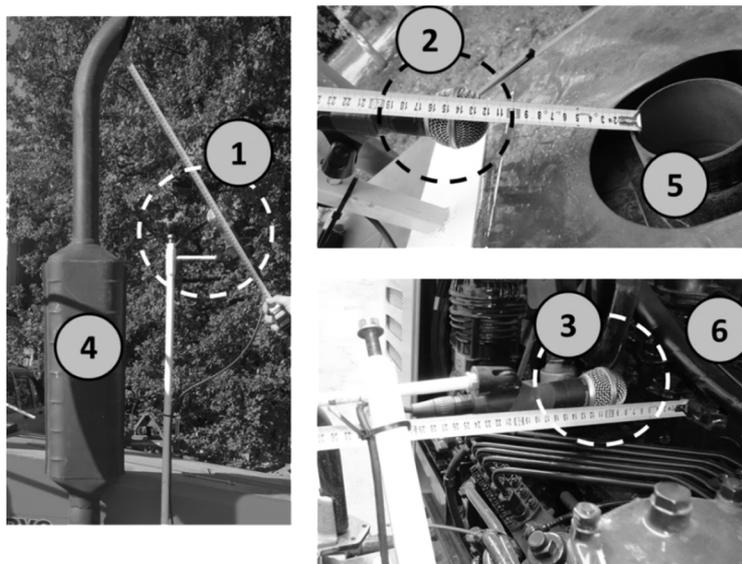
- запись внутреннего шума в кабине трактора;
- запись внешнего шума снаружи трактора;
- запись шума процесса выпуска;
- запись шума процесса впуска;
- запись структурного шума корпуса двигателя трактора;
- фиксация крюкового усилия, развиваемого трактором;
- регистрация уровней звука снаружи трактора;
- фиксация моментов начала испытаний и пересечения линий.

Наряду с этим визуально контролировалась мгновенная частота вращения двигателя трактора по тахоспидометру, установленному на панели приборов трактора.

При испытаниях вблизи основных источников шума, таких как выпускной срез глушителя, воздухозаборник и корпус двигателя (Рисунок 48), были установлены качественные динамические микрофоны Shure PG57, с линейной АЧХ.

Предварительно, перед испытаниями было произведено определение октавных передаточных характеристик микрофонов и найдены поправочные коэффи-

циенты, позволяющие после некоторой математической обработки записанных файлов получить их октавный спектр.



1 – микрофон, фиксирующий шум процесса выпуска; 2 – микрофон, фиксирующий шум процесса впуска; 3 – микрофон, фиксирующий структурный шум;  
4 – СГШ; 5 – впускной патрубок; 6 – двигатель Д-260

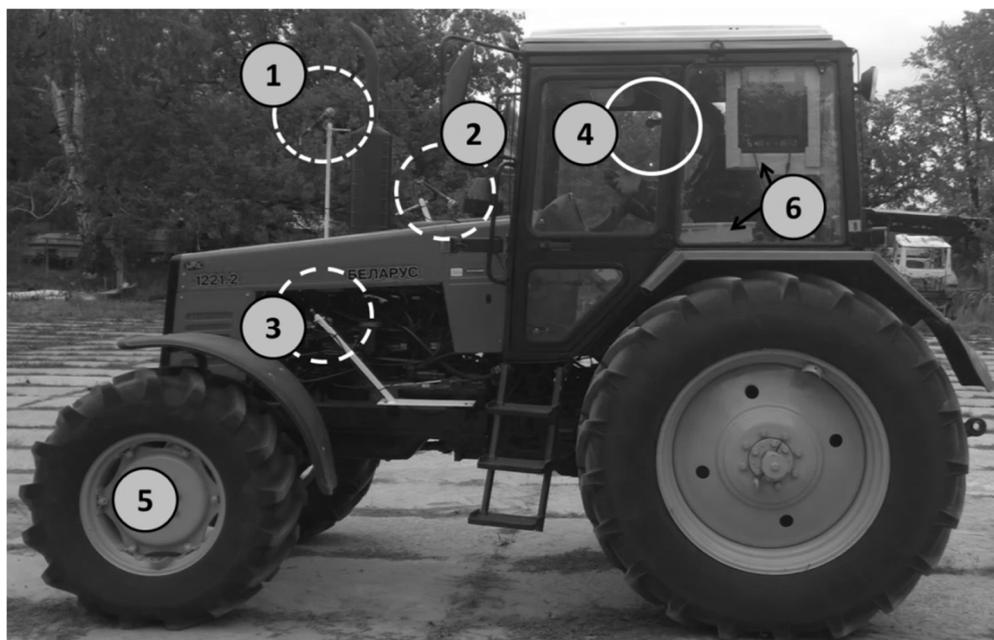
Рисунок 48 – Расположение микрофонов при тяговых испытаниях

Данные микрофоны, для исключения возможности записи звуковых волн других источников, были направлены в сторону наиболее интенсивного излучения звука источниками. Для установки микрофонов были созданы специальные крепления, которые позволяли изменять положение от микрофонов до источников шума.

Благодаря этому появилась возможность установки микрофонов на таких расстояниях от источников, которые позволяли бы писать звук с одинаковой занятостью динамического диапазона аудиокарты. В результате предварительных испытаний были приняты расстояния:

- 0,5 м для микрофона, фиксирующего шум процесса выпуска;
- 0,15 м для микрофона, фиксирующего шум процесса впуска;
- 0,1 м для микрофона, фиксирующего корпусный шум двигателя.

Еще один микрофон располагался внутри кабины оператора в зоне головы и фиксировал внутреннее звуковое поле. Взаимное расположение всех микрофонов, установленных на трактор Беларус-1221, представлено на рисунке 49.



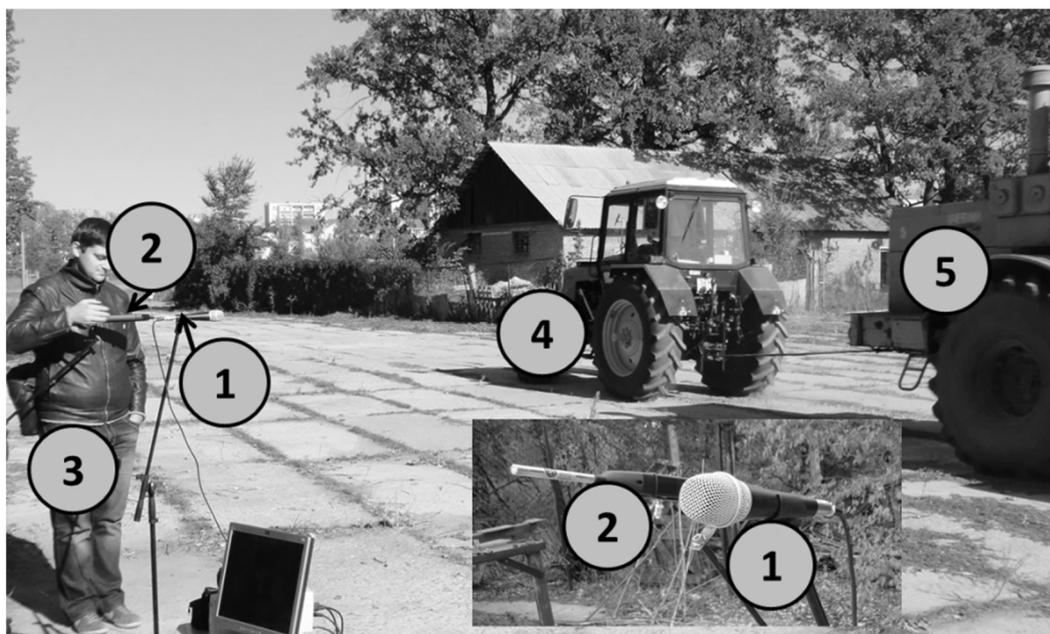
1 – микрофон, фиксирующий шум процесса выпуска; 2 – микрофон, фиксирующий шум процесса впуска; 3 – микрофон, фиксирующий структурный шум двигателя; 4 – микрофон, фиксирующий шум внутри кабины; 5 – трактор Беларус-1221;  
6 – монитор и системный блок персонального компьютера

Рисунок 49 – Расположение всех микрофонов и другого оборудования на тракторе

Сигналы с 4 микрофонов, расположенных на тракторе, усиливались качественными предварительными усилителями (микшерный пульт Behringer FX1204) с фиксированным коэффициентом усиления без какой-либо частотной обработки. Усиленные сигналы одновременно записывались персональным компьютером расположенным внутри кабины трактора (рисунок 49), оснащенный профессиональной аудиокартой Maudio Delta 1010 LT.

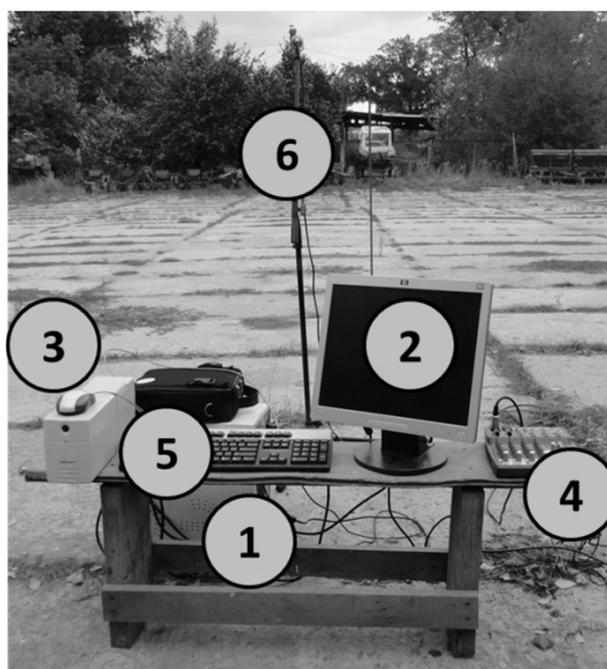
Снаружи, на расстоянии 10 метров от центральной линии движения трактора, располагался внешний микрофон и шумомер, они фиксировали внешнее звуковое поле. Шумомер использовался для получения контрольных характеристик внешнего шумового поля (Рисунок 50).

Внешний сигнал усиливался микшерным пультом Behringer 804 и фиксировался аудиокартой Creativ Audigy 2 с аналогичными характеристиками записи. Запись сигнала осуществлялась оператором ПК на организованном пункте записи (Рисунок 51).



1 – микрофон, фиксирующий внешнее шумовое поле; 2 – шумомер «Октава-110А»; 3 - оператор; 4 – трактор Беларус 1221; 5 – загрузочное устройство.

Рисунок 50 – Расположение микрофона и шумомера на испытательной площадке



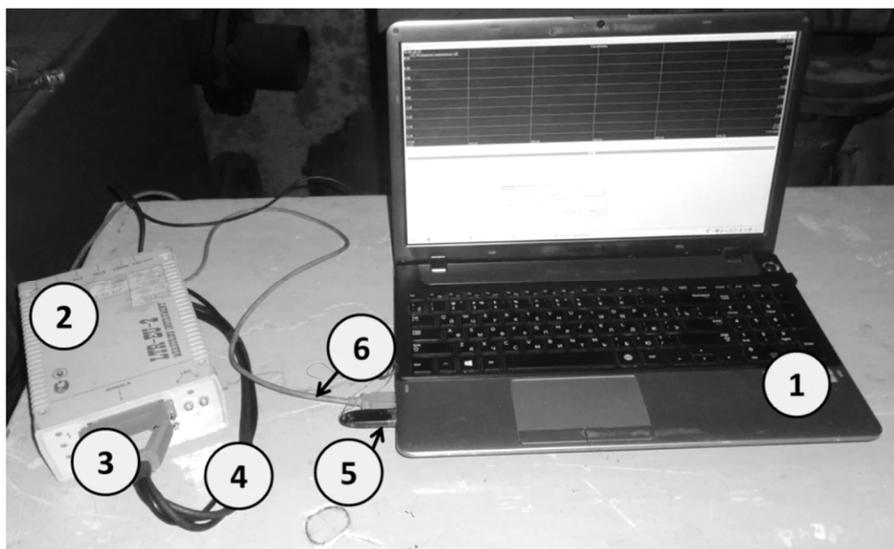
1 – системный блок ПК; 2 – монитор ПК; 3 - источник питания ПК; 4 – микшерный пульт; 5 – клавиатура и мышь ПК; 6 – внешний микрофон со стойкой.

Рисунок 51 – Место оператора ПК для записи внешнего шума

Для замера тягового усилия, то есть степени загруженности трактора, использовалось тензозвено с максимальным усилием 3 т. Предварительно данное звено было оттарировано в лабораторных условиях на разрывной машине. Резуль-

таты тарировки были использованы записывающим программным комплексом AStest Composer, что позволило в реальном времени следить за величиной действующего крюкового усилия и отображать данный сигнал на самописец.

Запись сигнала осуществлялась посредством прецизионного тензометрического модуля LTR-212, установленного в крейте LTR-2EU совместно с 16-канальным АЦП LTR-114. Сигнал записывался в файл на отдельный персональный компьютер, расположенный в кабине загрузочного трактора. Место оператора, управляющего процессом записи крюкового усилия, располагалось в кабине загрузочного устройства вместе с водителем трактора. Внешний вид крейта LTR-EU-2, соединенного с персональным компьютером, представлен на рисунке 52.



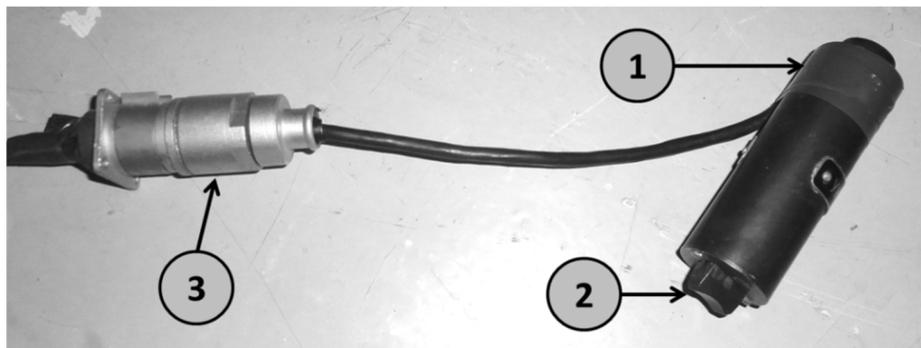
1 – ПК; 2 – крейт LTR-EU-2 с тензометрическим модулем LTR-212; 3 – клемма соединения; 4 – провода; 5 – ключ для ПО; 6 – USB-кабель.

Рисунок 52 – Соединение крейта LTR-EU-2 с ПК и тензомостами

Кроме этого, для получения сигнала, который позволит отобразить на графике крюкового усилия моменты синхронизации, пересечения начальной и конечной отметок, использовалась тензокнопка от усилителя ПИН-703, представленная на рисунке 53.

При нажатии в цепь сбалансированного тензомоста, расположенного внутри, добавлялось сопротивление, создающее дисбаланс, что выражается появлением некоторой «ступеньки» на самописце. Восходящий фронт первой ступеньки

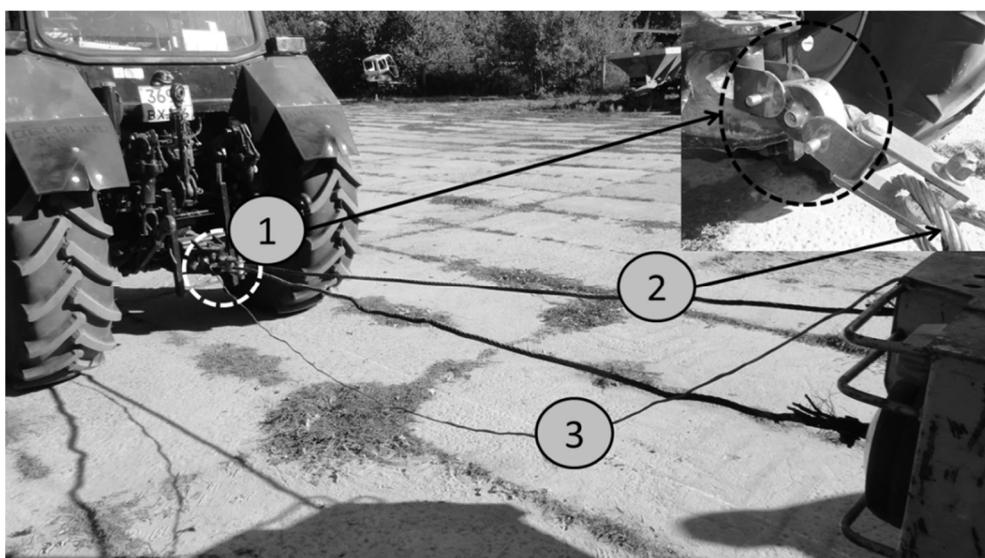
символизирует о подаче звукового сигнала испытуемым трактором для синхронизации всех записывающих устройств и начале испытаний, второй – пересечение передней осью испытуемого трактора начальной линии, третьей – пересечение передней осью испытуемого трактора конечной линии испытания.



1 – корпус; 2 – кнопка для надавливания; 3 – клемма для соединения.

Рисунок 53 – Тензокнопка тензоусилителя ПИН-703

К навесной системе трактора тензозвено крепится установкой пальца в ухо. Установка тензозвена на трактор показана на рисунке 54. Трос с тензозвеном соединяется посредством специально изготовленной серьги.



1 – тензозвено в сборе; 2 – соединительный трос; 3 – экранированный кабель.

Рисунок 54 – Установка тензозвена

Испытания проводились при отсутствии атмосферных осадков. Скорость ветра была ниже 1 м/с, что позволило производить испытания без ветрозащитного колпачка. Влажность, температура воздуха, атмосферное давление, вибрация и

непостоянные магнитные поля находились в пределах ограничений, определенных изготовителем аппаратуры [37].

Для исключения затухания звука, обусловленного звукопоглощением поверхности между испытываемой машиной и измерительной точкой, испытания проводились на жесткой отражающей поверхности - бетоне. Предварительно бетонная поверхность была очищена от пыли и песка. Место проведения испытаний – ровная площадка без отражающих вертикальных поверхностей на расстоянии не менее 50 м.

В шинах трактора Беларус-1221 устанавливалось и поддерживалось во время опытов давление, рекомендованное заводом-изготовителем: в передних - 0,13 – 0,15 МПа, задних также - 0,13 – 0,15 МПа. Износ рисунка протектора не превышал 35 % первоначальной высоты. За основу проведения тяговых исследований были приняты требования ГОСТ 7057-2001 [31].

Во время испытания не приводились в действие никакие сигнальные устройства. Разница между полезным сигналом и фоном достигалась не меньше 10 дБ (дБА), поэтому отсутствовала необходимость во введении поправочных значений.

В качестве грузозачерпывающего устройства использовался трактор общего назначения 5-го класса тяги Петербургского тракторного завода К-701 (Рисунок 55).



1 – объект испытаний; 2 – грузозачерпывающее устройство; 3 – плиты поверхности

Рисунок 55 – Грузозачерпывающее устройство

Для исключения возможности влияния шума источников данного трактора на записываемые микрофонами сигналы, во время испытаний его двигатель был

постоянно заглушен. В силу особенностей конструкции рулевого управления данного трактора это требование потребовало особой скрупулёзности при установке начального вектора направления движения, так как в процессе движения его физически невозможно было изменить.

Изменение крюкового усилия, которое необходимо было развить трактором Беларус-1221 для приведения в движение загрузочного устройства, достигалось понижением включенной передачи трактора К-701.

Размещение внешнего микрофона, а также положение начальной и конечной линий при проведении тяговых испытаний представлено на рисунке 56.

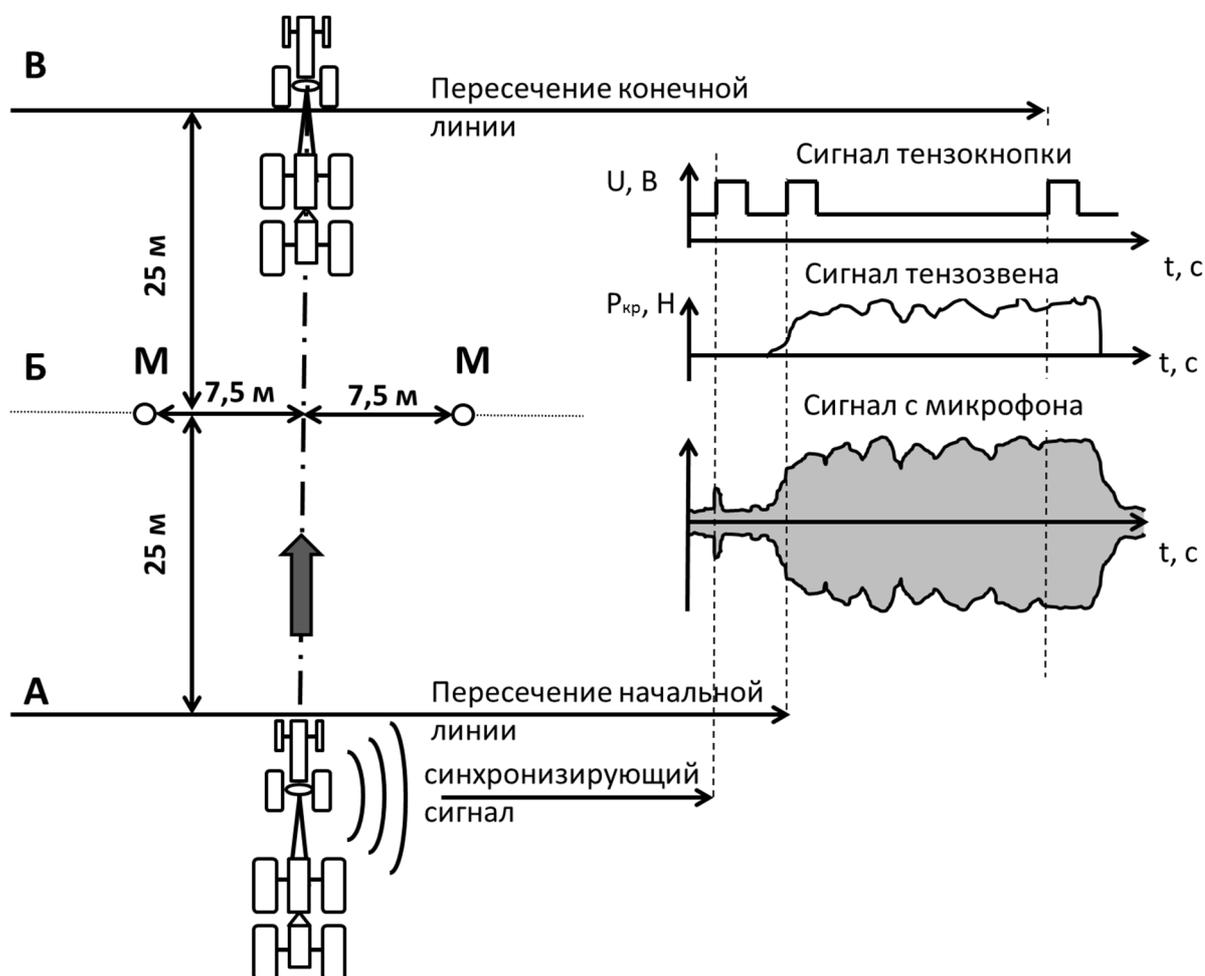


Рисунок 56 – Схема, поясняющая принцип проведения тяговых испытаний

Замер внешнего шума осуществлялся согласно методике, описанной в ГОСТ 51920-2002 [30]. Методика была незначительно дополнена изменениями, для возможности проведения тяговых исследований. Так, вместо 20 м гона использовалось расстояние в 50 м. Из-за отсутствия возможности одновременной

записи уровней звука с двух сторон объекта запись производилась со стороны расположения выхлопной трубы, так как предварительные испытания показали преобладающие значения уровней звукового давления при движении трактора именно с этой стороны.

Проведение эксперимента осуществлялось в следующей последовательности:

1. Испытуемый трактор оснащался трубой вместо стандартного глушителя шума выпуска.

2. Тракторы, соединенные тросом, выставлялись вдоль одной линии, причем особое внимание уделялось выравниванию направления загрузочного трактора, у которого устанавливалась некоторая передача, после чего производилась остановка его двигателя.

3. По сигналу оператора включалась запись сигналов на всех регистрирующих приборах, т.е. сигналов с 5 микрофонов, тензозвена и тензокнопки, а также шумомера.

4. До начала движения подавался звуковой предупредительный сигнал в качестве синхросигнала для всех микрофонов, при этом производилось нажатие на тензокнопку и её отпускание. Это выражалось появлением «ступеньки» на самописце, нарастающий фронт которой при обработке позволит совместить графики колебаний звукового давления с микрофонов и графики колебаний крюкового усилия (Рисунок 56). Кроме этого, данный сигнал позволяет построить взаимокорреляционные функции сигналов микрофонов, расположенных на тракторе с внешним микрофоном.

5. Начиналось движение агрегата, что приводило к возрастанию крюкового усилия и установлению его в определенном диапазоне.

6. При пересечении передней осью объекта испытаний стартовой линии производилось повторное нажатие-отпускание тензокнопки.

7. При пересечении передней осью объекта испытаний стоп-линии производилось последнее нажатие-отпускание тензокнопки.

8. Производилась остановка агрегата и прекращалась фиксация сигналов всеми записывающими устройствами.

9. Тракторы возвращались в исходное положение, после чего у загрузочного трактора изменялась испытываемая передача, и опыт повторялся со 2-го по 9-й пункт алгоритма.

10. Производилась замена трубы глушителем, сначала серийным, затем опытным.

Опыты выполнялись с тремя повторностями. Результаты опытов принимались как действительные при колебании УЗД каждой октавной полосы частот в пределах 2 дБ. При превышении данного диапазона результаты опыта отбрасывались, и опыт повторялся. Контролирующим прибором служил прецизионный шумомер «Октава-110А».

Статистическая обработка полученных данных осуществляется по описанной в пункте 3.3.2 диссертации методике. Только в данном случае используются шаги обработки с первого по пятый. Финальным шагом является получение октавного спектра сигнала разностью между посчитанными по пункту 5 значениями и поправками для отдельных микрофонов, полученными по пункту 3.3.2 диссертации.

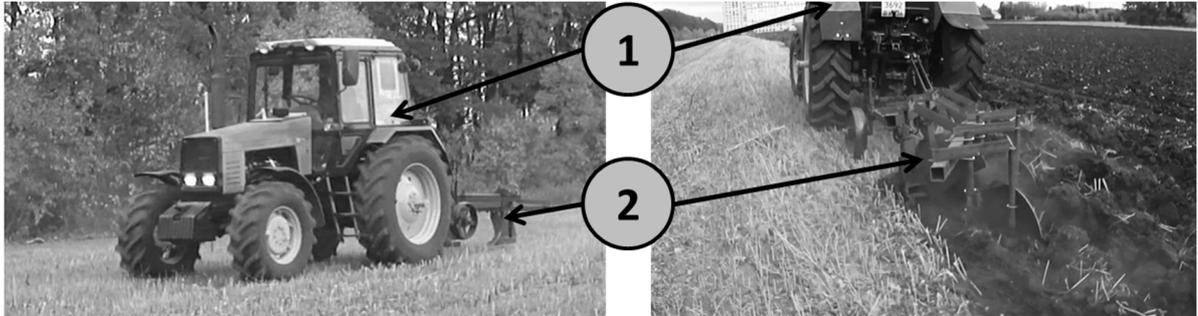
Статистическая обработка результатов замеров крюкового усилия производилась с использованием программного обеспечения ACSTest Analyzer. Усреднению подвергались все точки графика крюкового усилия, которые располагались между возрастающими фронтами 2-й и 3-й ступенек сигнала с тензокнопки (Рисунок 56).

Кроме этого, производилось определение автокорреляционных и взаимокорреляционных функций всех сигналов по формулам (51)-(54). Для этого было использовано программное обеспечение Microsoft Visual C++ Express 2010. Программы расчета данных функций представлены в приложениях В и Д.

При проведении полевых испытаний проводилась запись только внутреннего звукового поля и сигналов с микрофонов главных источников также как при

тяговых испытаниях. Запись крюкового усилия, моментов переезда стоп и стартовых линий не проводилась. Кроме этого, не проводились испытания с полым каналом.

Шумомер «Октава-110А» использовался для записи октавных спектров звука внутри кабины агрегата.



1 – трактор Беларус-1221; 2 – Плуг ПЛН-4-35

Рисунок 57 – Пахотный агрегат Беларус-1221 + ПЛН-4-35, используемый при проведении полевых испытаний

Полевые испытания производились на стерне зерновых культур с плугом ПЛН-4-35. Почва – выщелоченный чернозем, микрорельеф – неровный.

Предварительно был выбран участок поля с уклоном менее  $3^\circ$  с однородными свойствами почвы. Длина зачетного гона была выбрана 80 м. Выбор длины гона был обоснован необходимостью записи звуковых файлов продолжительностью не менее 20 секунд частотой дискретизации 44100Гц.

Подготовка трактора и сельхозорудий включала в себя проверку давления в шинах трактора, оснащение трактора регистрирующим оборудованием и проведение необходимых регулировок и пробных заездов.

Агрегат с установленным фиксирующим оборудованием и опытным или СГШ подъезжал к выбранному участку поля. После начала движения и заглубления плуга ПЛН-4-35 устанавливали рычаг подачи топлива в положение, соответствующее наибольшей подаче топлива. При установке режима движения начинали запись сигналов от микрофонов и включали шумомер. При каждом варианте глушителя делали три прохода в обоих направлениях. Обработка полученных результатов аналогична обработке, производимой по пункту 3.4 для тех же источников.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

### 4.1 Результаты тарирования тягового тензозвена

Определение коэффициентов полинома, которые позволят описать взаимосвязь между напряжением разбаланса тягового тензозвена и растягивающей силой, производилось по методике, описанной в п.п. 3.3.1 диссертации. Эти коэффициенты дадут возможность создать расчетный канал, позволяющий осуществлять запись крюкового усилия непосредственно в единицах силы.

Расчет коэффициентов полинома первой степени представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Обработка данных тарировки тензозвена

№ п/п	Разбаланс тензозвена U, мВ	Усилие P, кН	$\Delta U = U_{cp} - U$ , мВ	$\Delta P = P_{cp} - P$ , кН	$\Delta P^2$ , кН <sup>2</sup>	$\Delta P \cdot \Delta U$ , кН·мВ	P*, кН	$\Delta = P - P^*$ , кН	$\Delta^2$ , кН <sup>2</sup>
1	-0,005	0	0,545	10	100	5,452	-0,088	0,088	0,00768
2	0,11	2	0,430	8	64	3,442	2,038	-0,038	0,00145
3	0,218	4	0,322	6	36	1,934	4,037	-0,037	0,00133
4	0,327	6	0,213	4	16	0,853	6,053	-0,053	0,00285
5	0,432	8	0,108	2	4	0,217	7,996	0,004	0,00001
6	0,540	10	0,000	0	0	0,000	9,995	0,005	0,00003
7	0,645	12	-0,105	-2	4	0,209	11,938	0,062	0,00389
8	0,760	14	-0,220	-4	16	0,879	14,066	-0,066	0,00430
9	0,864	16	-0,324	-6	36	1,942	15,990	0,010	0,00010
10	0,972	18	-0,432	-8	64	3,454	17,988	0,012	0,00013
11	1,080	20	-0,540	-10	100	5,397	19,987	0,013	0,00017
$\Sigma$	5,943	110	0,0	0	440	23,779	110,0	0,0	0,02196

Значения во второй колонке таблицы получены усреднением по 6 отсчетам, полученным в результате трехкратной нагрузки-разгрузки в процессе тарировки.

Средние значения, необходимые для расчета по 4-му и 5-му столбцу, определяются делением сумм 2-го и 3-го столбца на число измерений  $n = 11$ .

$$\begin{cases} P_{cp} = 110/11 = 10 \text{ кН} \\ U_{cp} = 5,943/11 = 0,540 \text{ мВ} \end{cases}$$

Коэффициент полинома  $a$  определяется как отношение сумм элементов 6-го столбца таблицы к сумме элементов 7-го. Указанные суммы выделены в нижней строке таблицы 4.

$$a = \frac{440}{23,779} = 18,504 \frac{\text{кН}}{\text{мВ}}$$

Коэффициент полинома  $b$  находится по следующей зависимости:

$$b = P_{cp} - a \cdot U_{cp} = 10 - 18,504 \cdot 0,54 = 0,0027 \text{ кН}$$

Отсюда уравнение прямой, описывающей зависимость по формуле (41), выглядит следующим образом:

$$P_{кр}(U) = 18,504 \times U + 0,0027$$

График, описывающий представленную зависимость, показан на рисунке 58. Крестами указаны точки, полученные при тарировании.

Дисперсия, как сумма квадратов отклонений ординат точек, полученных в опыте, от соответствующих ординат аппроксимирующей прямой, рассчитана в нижней ячейке последнего столбца таблицы 5.

$$D = 0,02196 \text{ кН}^2$$

СКО определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{D}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,02196}{11-1}} = 0,047 \text{ кН}, \quad (55)$$

где  $n$  – число проведенных испытаний.

Средняя квадратическая ошибка арифметической средней вычисляется по следующей формуле:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,047}{\sqrt{11}} = 0,014 \text{ кН} \quad (56)$$

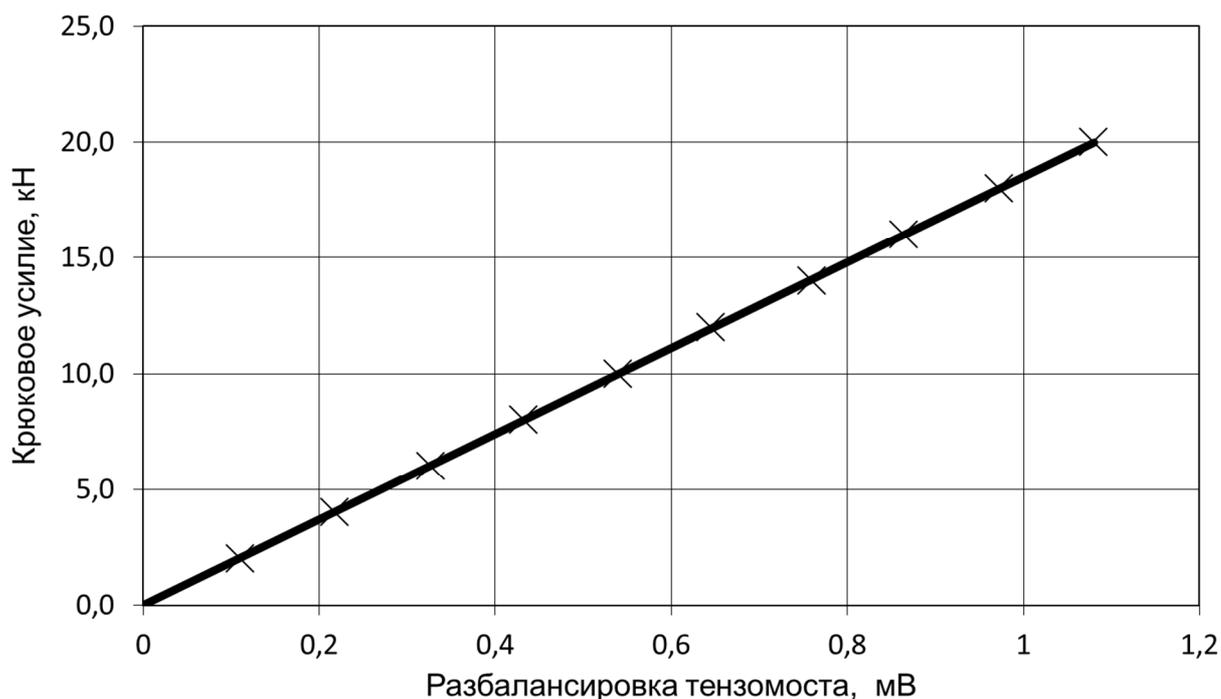


Рисунок 58 – Зависимость усилия на тензозвене от напряжения разбаланса моста

Максимальная погрешность среднего арифметического значения измерений определяется по известной формуле:

$$\Delta = \pm 3 \cdot \sigma_m = \pm 3 \cdot 0,014 = \pm 0,052 \text{ кН} \quad (57)$$

Относительная погрешность измерения крюкового усилия складывается из погрешности измерительного тензомодуля LTR-212 и погрешности расчета крюкового усилия

$$\frac{\Delta P_{кр}}{P_{кр}} = \left( \frac{\Delta}{P_{ср}} \right) \cdot 100\% + \delta \quad (58)$$

Относительная погрешность модуля в % согласно паспортной документации для диапазона измерений 0-10 мВ определяется по следующей формуле:

$$\delta = \left( 0,1 + 0,05 \cdot \left( \left| \frac{U}{U_{ср}} \right| - 1 \right) \right) \quad (59)$$

где  $U_{ср}$  – среднее значение выборки измеряемой величины, мВ.

$U$  – максимальное значение выбранного диапазона измерений, мВ.

$$\delta = \left( 0,1 + 0,05 \cdot \left( \left| \frac{10}{0,54} \right| - 1 \right) \right) = 0,98\%$$

Отсюда относительная погрешность измерения крюкового усилия равна

$$\frac{\Delta P_{кр}}{P_{кр}} = \left( \frac{0,052}{20} \right) \cdot 100\% + 0,98 = 1,24\%$$

#### **4.2 Результаты определения передаточных коэффициентов динамических микрофонов**

Определение передаточных коэффициентов микрофонов необходимо для получения возможности одновременной записи временных характеристик звуковых полей в разных точках и последующей обработки записанных данных для получения реальных октавных спектров.

Фрагмент спектра сигнала, полученного при записи первым микрофоном через усилительный тракт первого канала микшерного пульта, представлен в таблице 5.

Уровень звука соответствующий данному испытанию – 100дБ.

Частота генерируемого источником звука сигнала – 63 Гц.

В таблице представлены значения амплитуд в спектре от 0 до 365 Гц. Это означает, что в таблице представлены амплитуды звуковых частот, относящиеся как минимум к 4 октавным полосам:

1. 22-45 Гц;
2. 45-90 Гц;
3. 90-180 Гц;
4. 180-360 Гц.

Ячейки таблицы, в которых записаны амплитуды частот, лежащих в границах определенных октавных полос, для наглядности окрашены серым цветом одной интенсивности. Наиболее интенсивная окраска соответствует самой низкочастотной полосе. Как видно, в нее входит лишь одна составляющая дискретного спектра.

Таблица 5 – Фрагмент спектра сигнала от первого микрофона

№ п/п	Частота, Гц	Значение амплитуды гармоники	№ п/п	Частота, Гц	Значение амплитуды гармоники
1	0	51762	10	193,5	2370240,155
2	21,5	1441662,642	11	215	1266276,86
3	43	5216620,137	12	236,5	1201984,817
4	64,5	82843355,49	13	258	1614535,109
5	86	6540497,656	14	279,5	1196577,656
6	107,5	3523656,404	15	301	1278817,938
7	129	3144637,451	16	322,5	577725,1962
8	150,5	2078868,402	17	344	800140,4911
9	172	1666807,915	18	365,5	807035,879

Расчет суммарных значений амплитуд частот в октавных полосах для всех записанных сигналов с амплитудой 100дБ от первого микрофона усиленных первым каналом пульта, представлен в таблице 6.

Запись чисел носит экспоненциальный характер с целью минимизации размеров таблицы. Расчет определения максимальных поправок для октавных полос частот для первого микрофона и канала усиления при уровне звука 100 дБ представлен в таблице 7.

Поправка, получаемая в нижней строке таблицы, представляет собой разность пика амплитуды октавного спектра и исходного уровня звука.

Подобные расчеты выполнены для всех записанных сигналов, соответствующих уровням звука от 60 до 120 дБ. В таблице 8 представлен расчет средней поправки для сигнала первого микрофона, усиленного первым каналом микшерного пульта, для всех уровней звука.

Кроме этого, в таблице представлен расчет дисперсии, СКО и коэффициента вариации. Ошибка, получаемая при определении октавного спектра подобным образом, не превышает  $\pm 2,5$  дБ, чего вполне достаточно для дальнейших испытаний.

Таблица 6 – Суммарные значения амплитуд частот в октавных полосах для всех записанных сигналов 1-го канала для 100дБ

		Частота основного тона записанного сигнала, Гц									
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Среднегеометрическая частота октавной полосы звуковых частот, Гц	31,5	-	5,22E+06	3,87E+06	9,10E+06	6,37E+05	1,20E+06	8,17E+05	1,92E+06	3,87E+05	7,94E+05
	63	-	8,94E+07	1,04E+07	1,83E+07	2,05E+06	2,92E+06	1,71E+06	3,30E+06	1,11E+06	2,51E+06
	125	-	1,04E+07	7,29E+07	5,18E+07	5,13E+06	5,89E+06	3,51E+06	6,01E+06	2,80E+06	2,45E+06
	250	-	1,28E+07	1,47E+07	3,80E+08	2,83E+07	1,46E+07	8,97E+06	1,71E+07	6,18E+06	2,72E+06
	500	-	1,01E+07	6,44E+06	7,42E+07	3,73E+08	4,04E+07	1,80E+07	3,28E+07	6,96E+06	4,84E+06
	1000	-	8,51E+06	4,72E+06	3,57E+07	7,11E+07	3,53E+08	4,50E+07	6,23E+07	1,27E+07	1,62E+06
	2000	-	8,62E+06	4,45E+06	2,94E+07	5,40E+07	5,06E+07	7,65E+08	1,67E+08	2,91E+07	2,82E+06
	4000	-	8,96E+06	4,46E+06	2,82E+07	5,10E+07	3,93E+07	6,98E+07	2,35E+09	1,51E+08	5,56E+06
	8000	-	7,97E+06	3,83E+06	2,47E+07	4,50E+07	2,77E+07	4,26E+07	2,02E+08	8,27E+08	1,97E+07
	16000	-	1,21E+07	6,70E+06	3,75E+07	6,79E+07	4,06E+07	4,53E+07	1,65E+08	1,41E+08	2,45E+08

Таблица 7 – Определение поправок для октавных полос частот для первого микрофона и канала усиления для 100дБ

		Частота основного тона записанного сигнала, Гц									
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Среднегеометрическая частота октавной полосы звуковых частот, Гц	31,5	-	134,3	131,8	139,2	116,1	121,6	118,2	125,7	111,8	118
	63	-	159	140,3	145,2	126,2	129,3	124,7	130,4	120,9	128
	125	-	140,4	158,3	154,3	134,2	135,4	130,9	135,6	128,9	127,8
	250	-	142,1	143,4	171,6	149	143,3	139,1	144,7	135,8	128,7
	500	-	140,1	136,2	157,4	171,4	152,1	145,1	150,3	136,8	133,7
	1000	-	138,6	133,5	151,1	157	171	153,1	155,9	142,1	124,2
	2000	-	138,7	133	149,4	154,6	154,1	177,7	164,5	149,3	129
	4000	-	139	133	149	154,1	151,9	156,9	187,4	163,6	134,9
	8000	-	138	131,7	147,9	153,1	148,8	152,6	166,1	178,3	145,9
	16000	-	141,7	136,5	151,5	156,6	152,2	153,1	164,3	163	167,8
	ПИК		-	159	157,3	171,6	171,4	171	177,7	187,4	178,3
Расчетная поправка		-	59	58,3	71,6	71,4	71	77,7	87,4	78,3	67,8

Таблица 8 – Расчет средней поправки для сигнала первого микрофона, усиленного первым каналом микшерного пульта

		Среднегеометрическая частота октавных полос, Гц									
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Уровни звукового давления, дБ	60	58,8	60,1	59,5	70,9	71,2	70,9	76,3	87,2	78,3	68
	70	57,6	59,6	59,4	71,1	71	71,5	75,9	87,5	79,1	67,9
	80	59,1	59,2	58,8	71,5	70,8	72	75,5	87,8	79,9	67,7
	90	59,1	59,7	58,5	72	71,4	71,9	76,6	87,6	80,4	67
	100	-	<b>59</b>	<b>58,3</b>	<b>71,6</b>	<b>71,4</b>	<b>71</b>	<b>77,7</b>	<b>87,4</b>	<b>78,3</b>	<b>68</b>
	110	-	60,5	58,9	72,1	71	70,6	77,1	87,4	77,5	68,1
	120	-	-	59	71,2	71,2	70,9	76,4	87,3	78,4	68,1
Число данных		4	6	7	7	7	7	7	7	7	7
Сумма		234,6	358,9	412,3	500,4	498	498,8	535,5	612,2	551,9	474,8
Средняя поправка		<b>58,7</b>	<b>59,8</b>	<b>58,9</b>	<b>71,5</b>	<b>71,1</b>	<b>71,3</b>	<b>76,5</b>	<b>87,5</b>	<b>78,8</b>	<b>67,8</b>
Отклонения от среднего значения											
Уровни звукового давления, дБ	60	0,1	0,3	0,6	-0,6	0,1	-0,4	-0,2	-0,3	-0,5	0,2
	70	-1,1	-0,2	0,5	-0,4	-0,1	0,2	-0,6	0	0,3	0,1
	80	0,4	-0,6	-0,1	0	-0,3	0,7	-1	0,3	1,1	-0,1
	90	0,4	-0,1	-0,4	0,5	0,3	0,6	0,1	0,1	1,6	-0,8
	100	0	0,8	-0,6	0,1	0,3	-0,3	1,2	-0,1	-0,5	0,2
	110	0	0,7	0	0,6	-0,1	-0,7	0,6	-0,1	-1,3	0,3
	120	0	0	0,1	-0,3	0,1	-0,4	-0,1	-0,2	-0,4	0,3
Квадрат отклонения											
Уровни звукового давления, дБ	60	0,01	0,09	0,36	0,36	0,01	0,16	0,04	0,09	0,25	0,04
	70	1,21	0,04	0,25	0,16	0,01	0,04	0,36	0	0,09	0,01
	80	0,16	0,36	0,01	0	0,09	0,49	1	0,09	1,21	0,01
	90	0,16	0,01	0,16	0,25	0,09	0,36	0,01	0,01	2,56	0,64
	100	0	0,64	0,36	0,01	0,09	0,09	1,44	0,01	0,25	0,04
	110	0	0,49	0	0,36	0,01	0,49	0,36	0,01	1,69	0,09
	120	0	0	0,01	0,09	0,01	0,16	0,01	0,04	0,16	0,09
Дисперсия		1,54	0,99	1,28	1,23	0,31	1,79	3,22	0,25	6,21	0,92
СКО		0,72	0,44	0,46	0,45	0,23	0,55	0,73	0,2	1,02	0,39
Коэффициент вариации		1,2	0,7	0,8	0,6	0,3	0,8	1	0,2	1,3	0,6

Результат расчетов передаточных коэффициентов для всех остальных микрофонов представлен в таблице 9.

Промежуточные расчеты, аналогичные представленным, не приводятся с целью уменьшения общего объема текста. Графическое представление полученных поправок показано в приложении Е на рисунках 77-81.

Таблица 9 – Результаты расчета передаточных коэффициентов для всех каналов

Частота		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Канал №1	Средняя поправка	<b>58,7</b>	<b>59,8</b>	<b>58,8</b>	<b>71,6</b>	<b>71,1</b>	<b>71,3</b>	<b>76,5</b>	<b>87,5</b>	<b>79</b>	<b>67,4</b>
	Ср. кв. дисп.	1,2	0,9	0,9	0,9	0,5	1,3	1,6	0,4	2,3	0,5
	Коэффициент вариации	2	1,5	1,5	1,3	0,7	1,8	2,1	0,5	2,9	0,7
Канал №2	Средняя поправка	<b>58,9</b>	<b>60,6</b>	<b>58,2</b>	<b>69,3</b>	<b>68,5</b>	<b>70,7</b>	<b>75,9</b>	<b>83,6</b>	<b>79,9</b>	<b>64,5</b>
	Ср. кв. дисп.	0,6	0,9	0,7	0,7	0,9	1,1	1,5	0,5	2,6	0,8
	Коэффициент вариации	1	1,5	1,2	1	1,3	1,6	2	0,6	3,3	2,0
Канал №3	Средняя поправка	<b>60,7</b>	<b>61,7</b>	<b>58,9</b>	<b>72,3</b>	<b>72,6</b>	<b>72,2</b>	<b>74,5</b>	<b>87,9</b>	<b>82,8</b>	<b>68,1</b>
	Ср. кв. дисп.	0,4	0,8	1,2	0,8	0,6	1,2	0,1	0,7	1,8	0,4
	Коэффициент вариации	0,7	1,3	2	1,1	0,8	1,7	0,1	0,8	2,2	0,6
Канал №4	Средняя поправка	<b>57,7</b>	<b>59,5</b>	<b>57,9</b>	<b>68,5</b>	<b>70,7</b>	<b>69,9</b>	<b>79,5</b>	<b>84,6</b>	<b>83,4</b>	<b>64,7</b>
	Ср. кв. дисп.	0,7	0,7	0,8	0,9	0,7	1	1,6	0,5	1,8	0,4
	Коэффициент вариации	1,2	1,2	1,4	1,3	1	1,4	2	0,6	2,2	0,6
Канал №5	Средняя поправка	<b>59</b>	<b>60,4</b>	<b>58,5</b>	<b>70,4</b>	<b>70,7</b>	<b>71</b>	<b>76,6</b>	<b>85,9</b>	<b>81,3</b>	<b>66,2</b>
	Ср. кв. дисп.	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	1,2	1,2	0,5	2,1	0,3
	Коэффициент вариации	1,2	1,4	1,5	1,2	1	1,6	1,6	0,6	2,7	0,5

Как видно из данных, приведенных в таблице 10 и представленных в приложении Е графиков, поправочные коэффициенты, рассчитанные для всех пяти каналов, очень близки по величине. Этот факт характеризует высокую степень схожести всех пяти измерительных каналов.

Максимальная разность между величинами поправок разных каналов для одной полосы частот составляет 5 дБ. Эта разность характерна для поправок 3-го и 4-го каналов на полосе со среднегеометрической частотой 2кГц.

После расчета поправочных коэффициентов были осуществлены контрольные замеры широкополосного шума, созданного источником. Последующая обработка результатов с использованием поправочных коэффициентов показала, что максимальная разница между значениями, полученными прецизионным шумомером и расчетными, не превышает 2,8 дБ.

Поэтому полученные поправочные коэффициенты будут использованы при определении октавных спектров шума основных источников тракторов, а также внешнего и внутреннего звуковых полей.

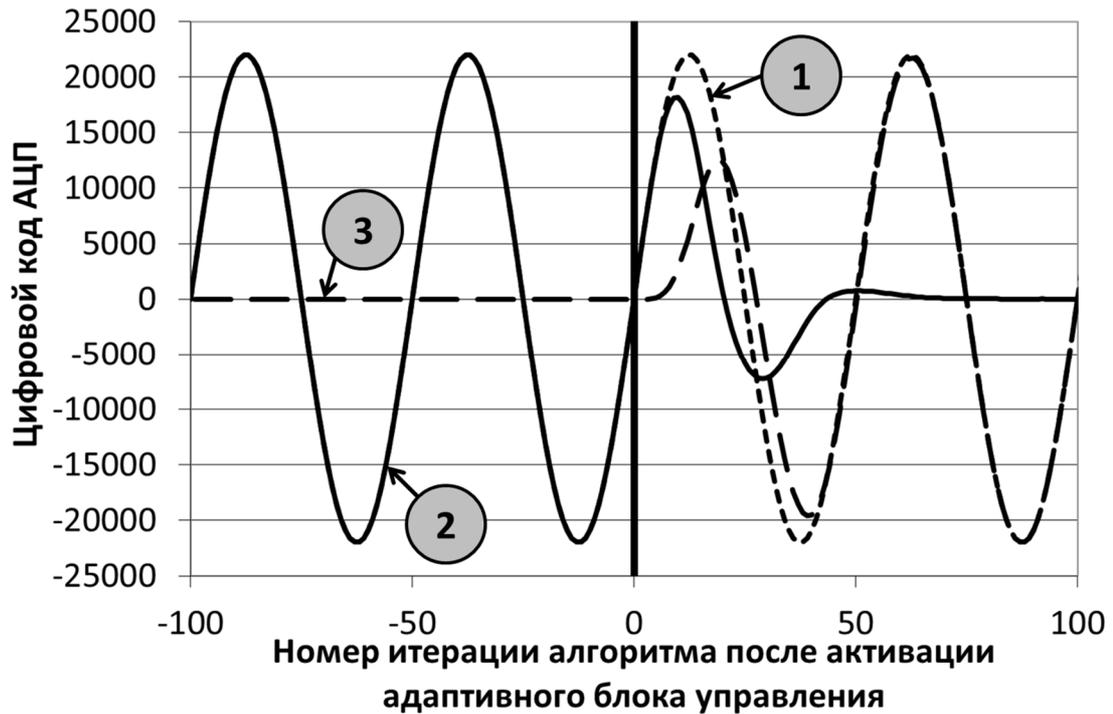
### **4.3 Результаты испытаний эффективности адаптивного блока управления**

Лабораторные испытания эффективности адаптивного блока управления носили поисковый характер, они выполнялись по методике, изложенной в пункте 3.3.3 диссертации.

Наибольшую эффективность по снижению низкочастотных шумов показал алгоритм FxLMS, т.к. его эффективность в среднем на 6 дБ выше, чем у leaky LMS, и на 10 дБ - LMS. При этом наиболее устойчивым оказался алгоритм leaky LMS, на него меньше всего влияло увеличение фактора сходимости. Самым слабым с точки зрения эффективности и устойчивости оказался стандартный алгоритм наименьших средних квадратов.

При правильном подборе значения фактора сходимости наибольшую эффективность обеспечил алгоритм FxLMS, поэтому в дальнейшем будут приведены данные записи, полученные при использовании только этого алгоритма.

Влияние формы сигнала на эффективность подавления будет представлено группой рисунков, показывающих сигналы, полученные при следующих параметрах адаптивного фильтра: порядок фильтра  $N = 128$ , фактор сходимости  $\mu = 5626$ . Наиболее поддающейся адаптивному снижению амплитуды является синусоидальная форма сигнала. На рисунке 59 представлен результат записи процесса подавления тонального синусоидального сигнала.



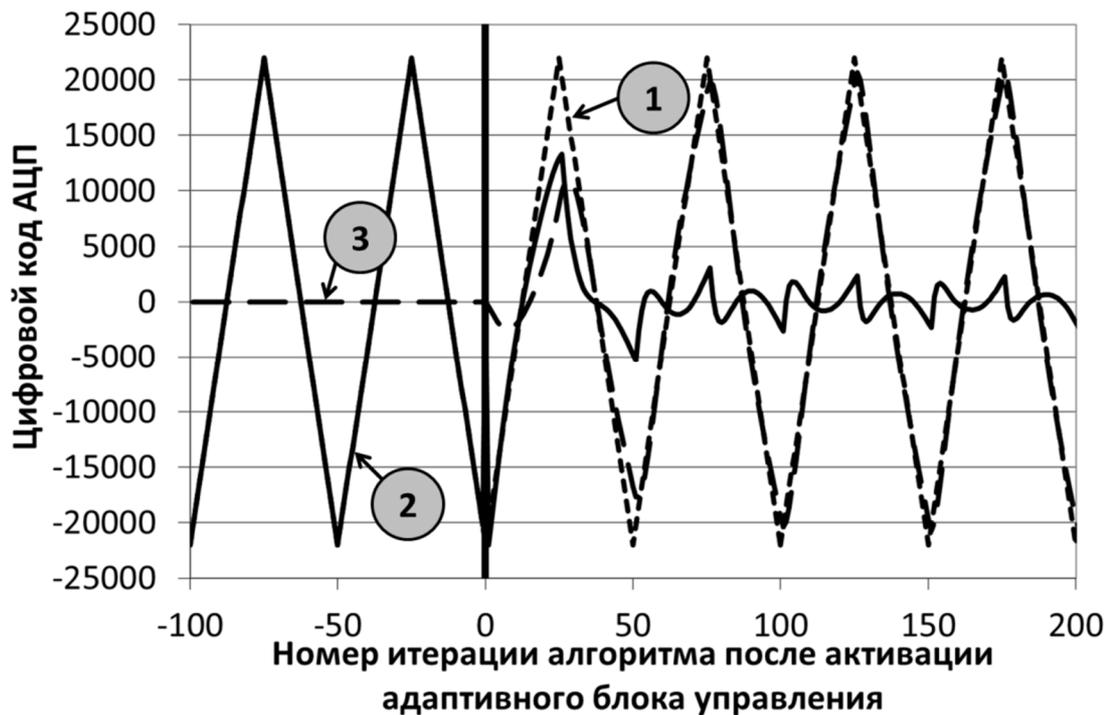
1 – сигнал источника; 2 – остаточный сигнал; 3 – сигнал ИАЗ

Рисунок 59 – Эффективность снижения синусоидального сигнала

Как видно из графиков, результатом является почти полное подавление сигнала менее чем за 100 итераций основного алгоритма. Полученная эффективность – 63 дБ.

На рисунке 60 представлены аналогичные результаты, полученные при снижении сигнала треугольной формы.

Показанная на рисунке треугольная форма сигнала при генерации стандартными громкоговорителями искажается, поэтому реальная форма звуковой волны, которая образуется вблизи ИАЗ, немного отличается от исходной, так как пропадают треугольные пики. Тем не менее общая треугольная форма сохраняется, что позволяет исследовать этот вид сигнала при активном его подавлении. Вид кривой остаточного сигнала также объясняется резкими пиками исходного сигнала. Остаточный шум значительно выше, чем при гашении синусоидального сигнала, хотя скорость сходимости алгоритма практически не изменилась.



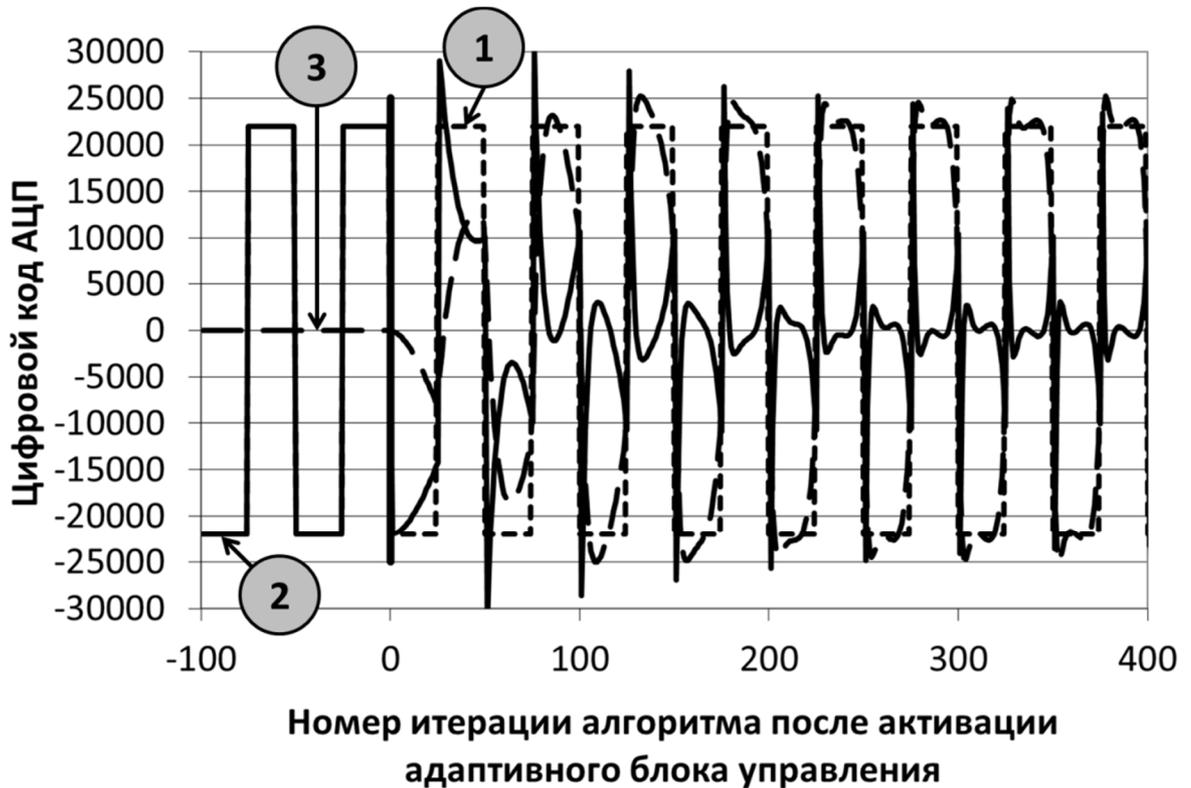
1 – сигнал источника; 2 – остаточный сигнал; 3 – сигнал ИАЗ

Рисунок 60 – Эффективность снижения сигнала треугольной формы

Общая эффективность активного гашения треугольного звукового сигнала – 23дБ.

Результат снижения прямоугольного сигнала (меандра) показан на рисунке 61. Подобная форма звуковой волны характеризует импульсные шумы, как правило, имеющие непериодический характер. Она, как и сигнал треугольной формы, искажается в процессе усиления и генерации, что приводит к сглаживанию резких изменений знака сигнала. Эффективность при снижении подобной формы сигнала относительно невысока - 16,5 дБ. Время схождения фильтра – около 400 итераций.

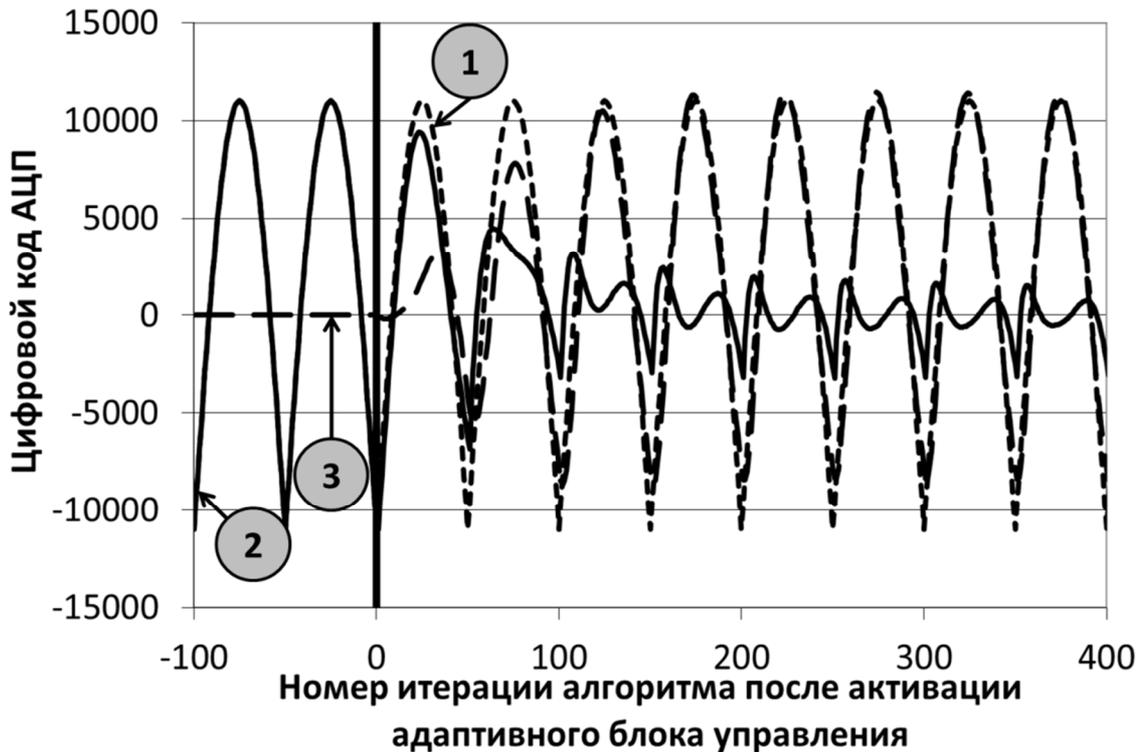
В качестве сигнала сложной формы использовался модуль синуса. Результат испытания эффективности адаптивного блока управления по гашению такого сигнала представлен на рисунке 62. Общая эффективность – 21 дБ. Сходимость чуть более 600 итераций.



1 – сигнал источника; 2 – остаточный сигнал; 3 – сигнал ИАЗ

Рисунок 61 – Эффективность снижения сигнала прямоугольной формы:

Влияние фактора сходимости на устойчивость и скорость сходимости адаптивного фильтра при гашении синусоидального сигнала представлено на рисунке 63. Как видно из представленного рисунка увеличение фактора сходимости приводит к более быстрому схождению, и уменьшению начальных амплитуд. При этом конечные амплитуды сигнала, наблюдаемые после сходимости выше, чем получаемые при меньшем значении фактора сходимости. Кроме этого, при высоких значениях фактора сходимости значительно возрастает риск расхождения фильтра. Это наблюдается при значении  $\mu = 0x5000$  (шестнадцатеричное представление). При установке более высоких значений фильтр расходится быстрее. После многочисленных экспериментов было подобрано значение, обеспечивающее высокую эффективность, быстродействие и устойчивость алгоритма, которое применялось во всех дальнейших испытаниях ( $\mu=0x15FA$ ).



1 – сигнал источника; 2 – остаточный сигнал; 3 – сигнал ИАЗ

Рисунок 62 – Эффективность снижения сигнала сложной формы

Одним из наиболее важных параметров, наиболее сильно влияющих на эффективность алгоритма, является число весовых коэффициентов, используемых в фильтре (глубина буферизации), или порядок фильтра.

Как правило, количество весовых коэффициентов подбирается равным двум в некоторой степени. Это упрощает адресацию, а также операции деления на число можно заменить более быстрым сдвигом разрядов. Использование малого числа весовых коэффициентов не позволяет достичь высокой скорости сходимости, а также общей эффективности подавления. Применение чрезмерно большого порядка фильтра снижает скорость, устойчивость алгоритма и может приводить к переполнению аккумулятора в арифметико-логическом устройстве процессора цифровой обработки сигналов.

На рисунке 64 представлены результаты испытаний алгоритма по гашению синусоидальной волны при использовании различного количества весовых коэффициентов. Наибольшую эффективность показал алгоритм, использующий 128 весовых коэффициентов.

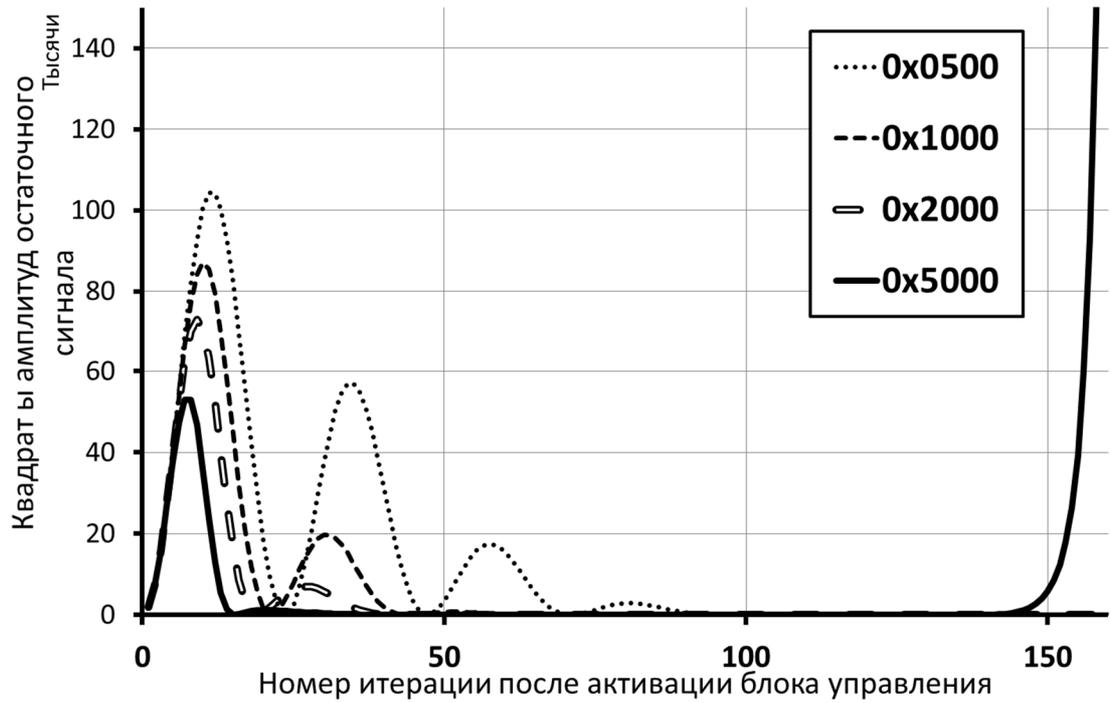


Рисунок 63 – Эффективность гашения и сходимость в зависимости от величины фактора сходимости  $\mu$

В результате испытаний эффективности адаптивного блока управления были подобраны следующие его параметры: порядок фильтра – 128 коэффициентов, фактор сходимости -  $\mu = 0x15FA$ .

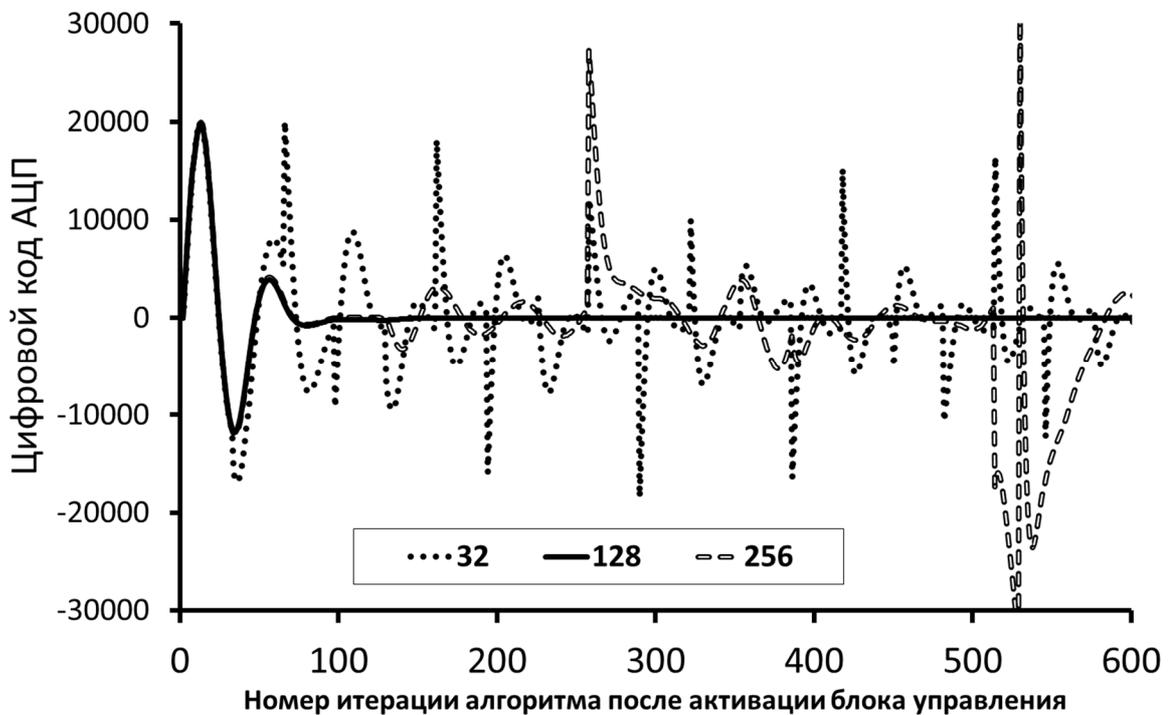


Рисунок 64 – Влияние числа коэффициентов адаптивного фильтра на эффективность шумоподавления

Кроме этого, удалось установить, что наибольшей эффективностью обладает алгоритм FxLMS.

Наиболее подвержены снижению синусоидальные низкочастотные сигналы без резких изменений в форме. Лучше всего снижаются сигналы с одной тональной составляющей.

Интенсивные высокочастотные составляющие в спектре шума выпуска, а также резкие импульсные изменения шума активным способом поглощаются плохо и могут приводить к расходимости алгоритма, поэтому необходимо применение низкочастотных фильтров после микрофонов, с полосой пропускания, ограниченной частотным диапазоном эффективного применения активного подавления.

#### **4.4 Результаты лабораторных исследований аэродинамических потерь, развиваемых в глушителе**

Усредненные результаты трехкратных замеров противодавления, развиваемого в конечном элементе выпускного тракта глушителя приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты замера противодавления, мм вод. Ст

№ п/п	Тип выпускного канала	Частота вращения двигателя, об/мин				
		900	1200	1500	1800	2100
1	Полая труба	10	7	8,3	7,3	6,7
2	СГШ	52,7	115,3	179,7	266,7	450
3	Опытный глушитель шума	20	39,7	61	95	142

Результаты определения относительной погрешности измерения противодавления на всех режимах приведены в таблице 11. Как видно из данных таблицы, при трехкратной повторности опытов были получены весьма сходные результаты, поэтому максимальная погрешность измерения противодавления для СГШ и ГШАТ составляет 13,4 %. Погрешность, полученная при замере аэродинамического сопротивления полой трубы, значительно выше

вследствие сложности повторения условий эксперимента, обеспечивающих высокую точность.

Таблица 11 – Погрешность замера противодавления, %

№ п/п	Тип выпускного канала	Частота вращения двигателя, об/мин				
		900	1200	1500	1800	2100
1	Полая труба	50,0	85,7	56,6	64,4	49,3
2	СГШ	12,0	2,0	2,1	2,5	1,3
3	Опытный глушитель шума	0,0	13,4	3,3	7,4	3,5

В таблице 12 приведены результаты расчета противодавления, создаваемого конечным элементом выпускного тракта трактора Беларус-1221. На рисунке 65 представлены графическое отображение зависимости развиваемого противодавления от частоты вращения двигателя.

Таблица 12 – Рассчитанные значения противодавления, кПа

№ п/п	Тип выпускного канала	Частота вращения двигателя, об/мин				
		900	1200	1500	1800	2100
1	Полая труба	0,1	0,07	0,08	0,07	0,07
2	СГШ	0,52	1,13	1,76	2,62	4,41
3	Опытный глушитель шума	0,2	0,39	0,6	0,93	1,39

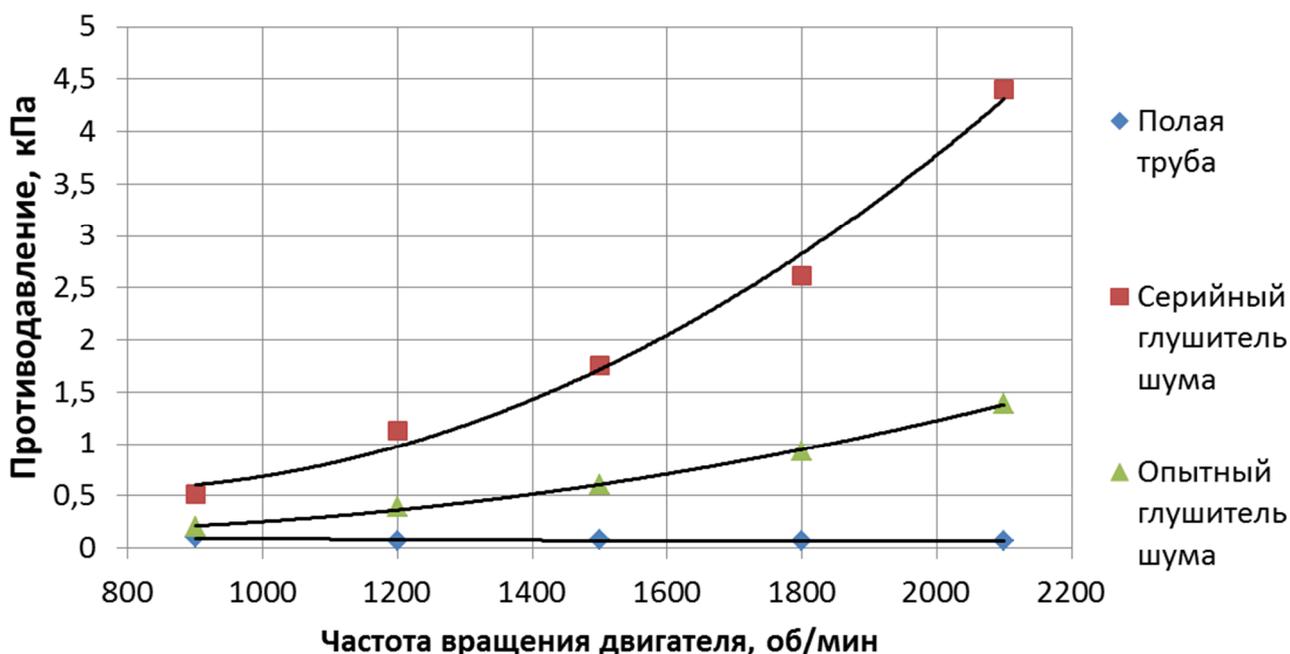


Рисунок 65 – Зависимость противодавления от частоты вращения

Как видно из графиков, противодействие, развиваемое опытным глушителем шума, в среднем на 1,4 кПа ниже, развиваемого СГШ.

Результаты расчетов относительного противодействия, определяемого по формуле (37), приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Рассчитанные значения относительного противодействия, %

№ п/п	Тип выпускного канала	Частота вращения двигателя, об/мин					Среднее значение, %	СКО, %
		900	1200	1500	1800	2100		
1	СГШ	520	1614,3	2200	3742,9	6300	2875,44	2240,3
2	Опытный глушитель	200	557,1	750	1328,6	1985,7	964,28	702,1

Как видно из таблицы среднее значение относительного противодействия СГШ составляет 2875,4 %, в то время как для ГШАТ - 964,3 %. Это означает, что использование ГШАТ создает дополнительный резерв возможностей для некоторого снижения расхода топлива двигателем.

Для проверки адекватности разработанной математической модели по определению аэродинамического сопротивления, развиваемого глушителем шума ГШАТ, был осуществлен расчет, результаты которого представлены на рисунке 66.

При расчете использовались исходные данные, представленные в таблице 14.

Таблица 14 – Исходные данные для расчета

Литраж двигателя Д-260.11, л	7,12
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	1,295
Давление воздуха, МПа	0,1
Давление выхлопных газов, МПа	0,115
Температура выхлопных газов, К	800
Кинематическая вязкость выхлопных газов, м <sup>2</sup> /с	76,3·10 <sup>-6</sup>

Как видно на рисунке 66, расчетная кривая с определенной точностью описывает характер зависимости. Наибольшее расхождение показателей

наблюдается при частоте вращения двигателя 1500 об/мин. Это может быть вызвано неточностью задания исходных данных, которые брались из справочных материалов.

Максимальное расхождение опытных и расчетных результатов составляет 0,125 кПа. Интересно отметить, что относительная погрешность изменяется от 17,2% для 900 об/мин до 2,2% при частоте 2100 об/мин.

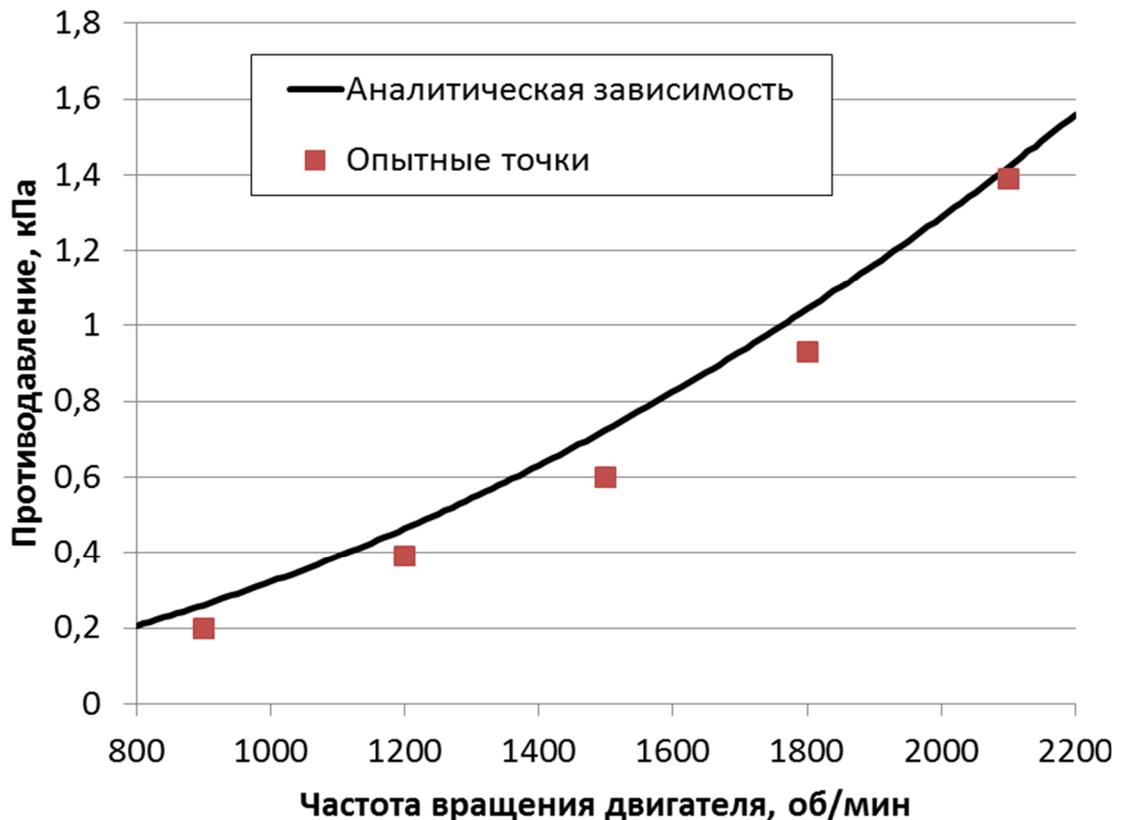


Рисунок 66 – Взаимосвязь опытных данных и расчетной кривой

На рисунке хорошо видна высокая взаимосвязь данных, полученных из математической модели, и данных, полученных опытным путем.

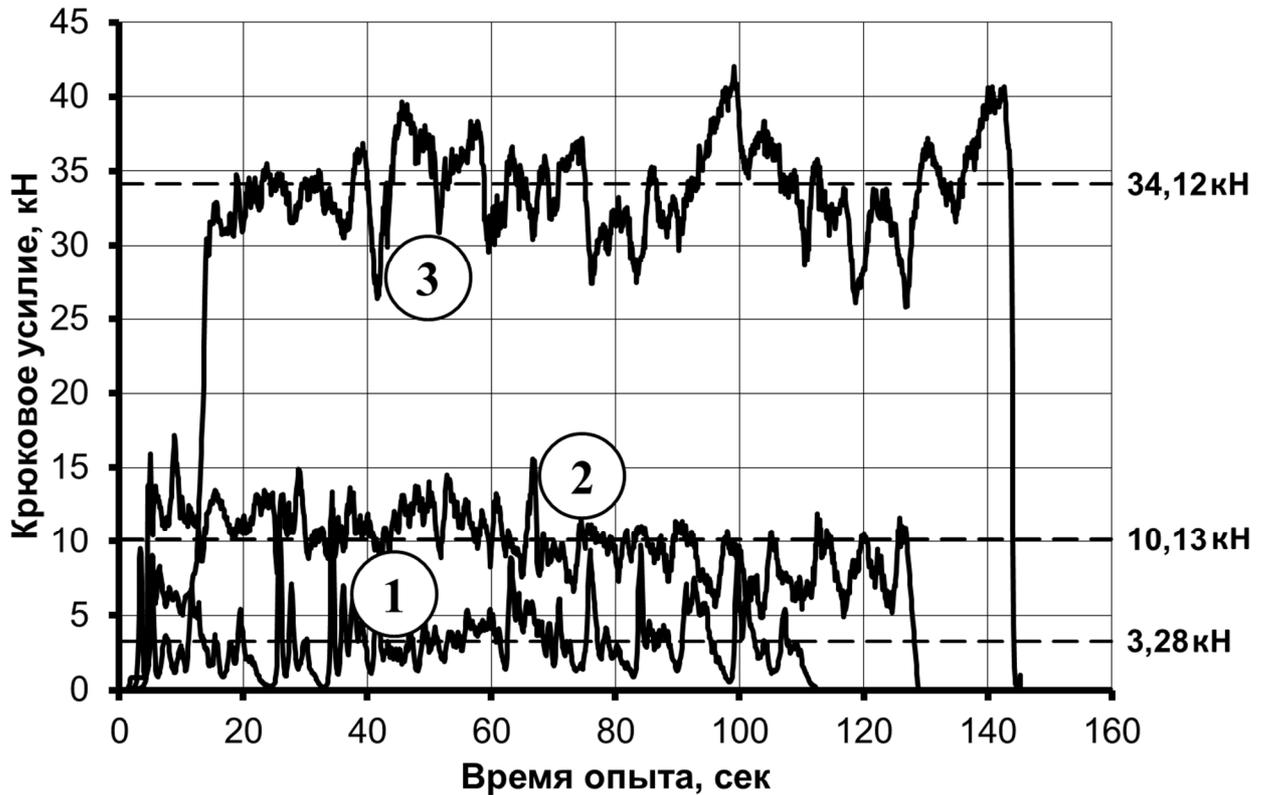
#### 4.5 Анализ результатов полевых и тяговых испытаний

В результате проведения тяговых испытаний были получены звуковые файлы и файлы записи крюкового усилия и сигнала с тензодатчика.

Звуковые файлы были обработаны по методике, изложенной в п.п. 3.4 диссертации. В результате были получены зависимости уровней звукового давления в октавных полосах частот для различных режимов нагружения трактора во всех имеющихся точках записи сигналов. Кроме этого, были по-

лучены автокорреляционные и взаимокорреляционные функции всех сигналов, с целью определения их особенностей и принципов взаимодействия.

Файлы записи сигналов с тензозвена и тензокнопки также подверглись анализу с целью определения средних значений усилий и других параметров сигналов. Графики зависимости крюкового усилия от времени наиболее значимых испытаний представлены на рисунке 67.



1 – холостой ход; 2 – III режим 3-я передача; 3 – III режим 1-я передача

Рисунок 67 – Сила тяги на крюке

Результаты обработки сигналов с тензозвена и тензокнопки представлены в таблице 15. Как видно из данных таблицы, наибольший интерес представляют результаты, полученные при включении у загрузочного трактора на III режиме 1-й и 2-й передачи, и при отключенной трансмиссии.

С ростом среднего значения наблюдается соответствующий рост размаха колебаний тягового усилия, что подтверждается представленными в таблице 15 данными. При этом интерес представляет поведение звуковых

сигналов от основных источников, при таких резких перепадах крюкового усилия.

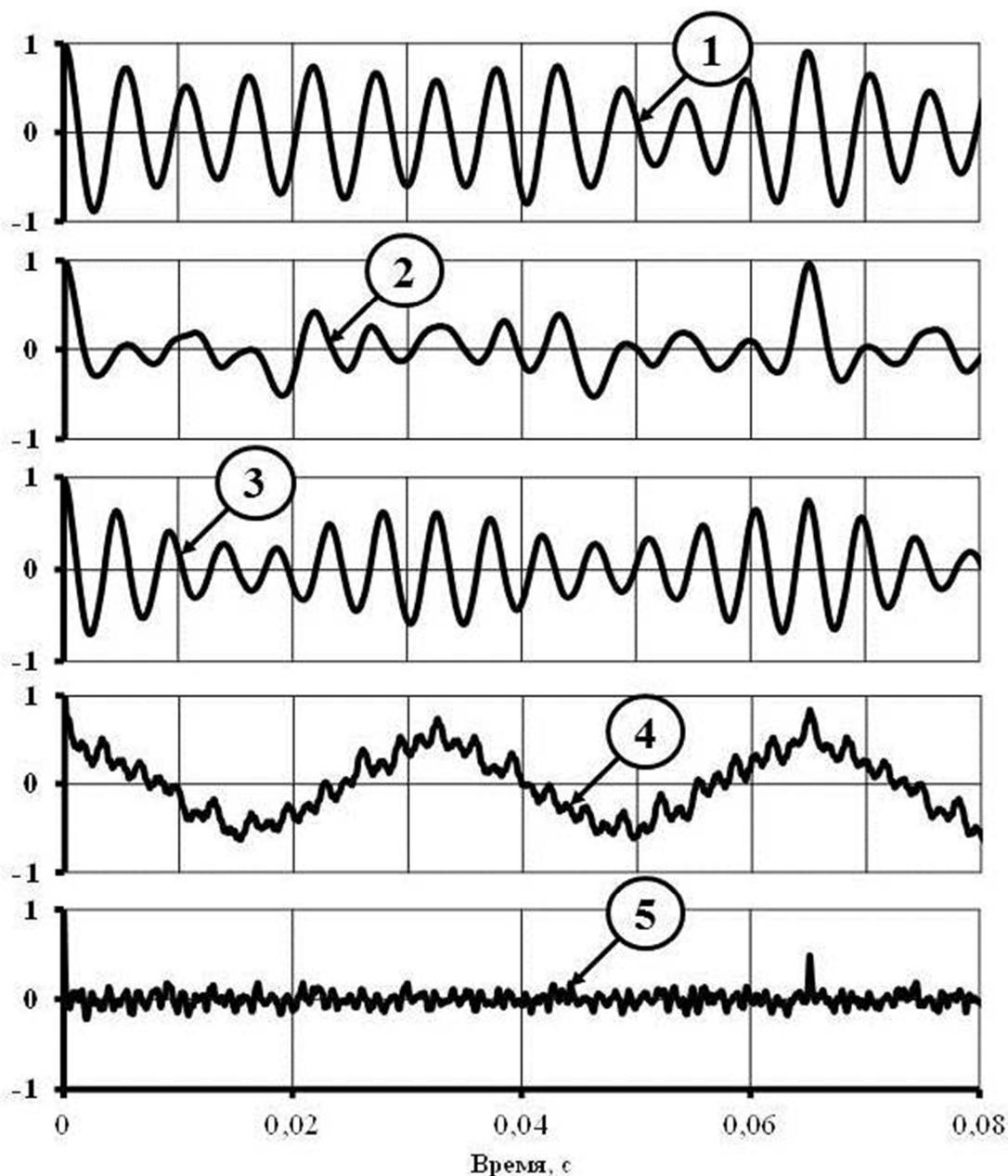
Таблица 15 – Результаты замера тягового усилия

Передача на загрузочном устройстве	Длительность опыта, с	Минимальное значение, кН	Максимальное значение, кН	Среднее значение, кН	Дисперсия	СКО
Трансмиссия отключена	101,01	0,05	13,79	<b>3,28</b>	2,75	1,63
III режим 4-я передача	107,53	1,08	10,79	4,96	2,85	1,69
III режим 3-я передача	110,4	1,47	10,51	5,37	2,59	1,61
III режим 2-я передача	122,69	4,49	17,52	<b>10,13</b>	4,43	2,1
III режим 1-я передача	176,23	25,09	42,42	<b>34,12</b>	9,73	3,12

Анализ изменения частоты пиковой спектральной составляющей показывает, что сигнал сохраняет стационарность даже при значительных колебаниях крюкового усилия. Устойчивая периодичность сигнала подтверждается нормированными автокорреляционными функциями (Рисунок 68).

Здесь и далее по главе, если не будет сказано конкретно, представленные графики будут соответствовать самому напряженному режиму испытаний со средним крюковым усилием 34,12 кН. Это обусловлено высокой степенью схожести результатов для всех режимов. Для построения данных графиков использовались выборки сигналов по 4096 значениям со всех датчиков, взятым в момент времени, соответствующий максимальному приближению трактора к внешнему микрофону.

Как видно из представленных графиков, второй по амплитуде пик для всех сигналов соответствует временной задержке около 65 мс. Это означает присутствие в спектре сигналов преобладающей инфрочастотной составляющей. Автокорреляционные функции для всех оставшихся исследуемых режимов весьма сходны с представленными на рисунке 68, что также подтверждает значительную стационарность сигналов.



1 – процесс выпуска ОГ; 2 – процесс впуска свежего заряда; 3 – шум корпуса двигателя; 4 – шум внутри кабины; 5 – внешний шум трактора.

Рисунок 68 – Автокорреляционные функции сигналов, полученных при крюковой нагрузке 34,12 кН

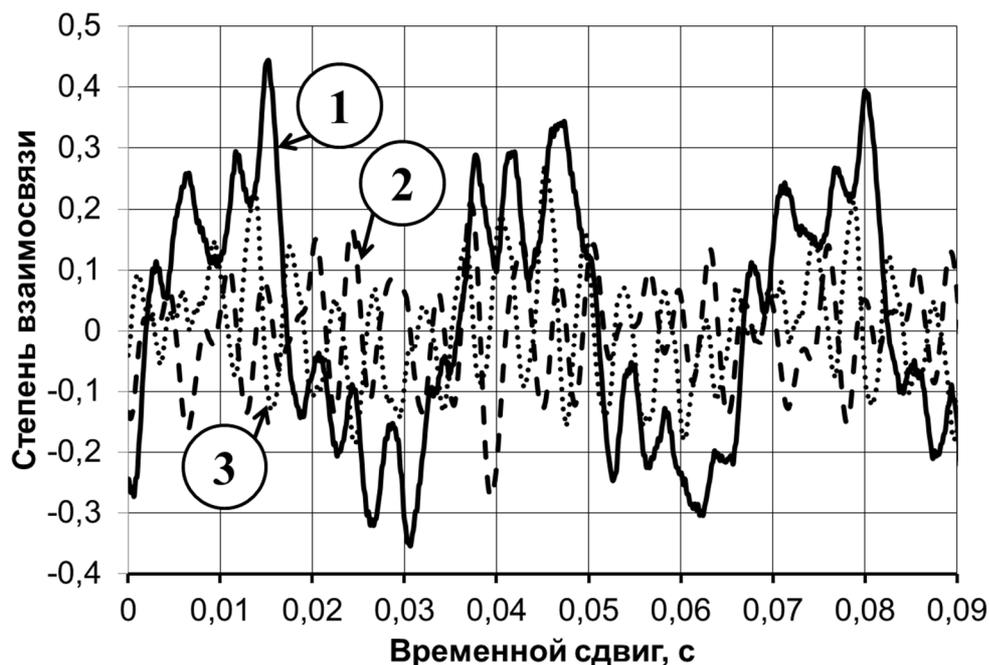
В автокорреляционной функции процесса выпуска (Рисунок 68, линия 1) хорошо заметна низкочастотная составляющая с периодом колебаний  $\sim 6$  мс, которая соответствует основной частоте работы двигателя.

Как видно из рисунка 68, периодичность сигнала, фиксируемого наружным микрофоном, практически отсутствует, что может быть объяснено

относительным перемещением источников шума с постоянно изменяющейся скоростью. Это вызывает «плавание» спектра и нестационарность фиксируемого сигнала, поэтому для дальнейших исследований влияния 3 основных источников на звуковое поле трактора данный сигнал использоваться не будет.

Отсутствие влияния на спектральные характеристики шума процесса выпуска колебаний крюкового усилия, а также устойчивая его периодичность (Рисунок 68, линия 1), является одной из основных предпосылок для обоснования перспективности применения САШ в глушителе.

Чтобы оценить вклад сигнала от каждого источника в звуковое поле внутри кабины, были построены графики нормированной функций взаимной корреляции между сигналом, записанным микрофоном внутри кабины, и сигналами от других источников (Рисунок 69).



1 – шум процесса выпуска; 2 – шум процесса впуска; 3 – шум корпуса.

Рисунок 69 – Функции взаимной корреляции

Из представленных графиков следует, что наибольший вклад в формирование шума внутри кабины оказывает шум процесса выпуска. Как следует из функции взаимной корреляции этих двух сигналов, его вклад составляет до 45% от общего звукового поля. Кроме этого, наблюдается периодичность

этой функции взаимной корреляции, что символизирует о неслучайном и устойчивом характере этого взаимодействия. Это означает, что мероприятия по снижению внутреннего шума в кабине трактора «Беларус-1221» должны быть направлены на совершенствование способов снижения шума процесса выпуска.

Над полученными выборками сигналов было произведено дискретное преобразование Фурье, и найден узкополосный спектр данных сигналов с шириной одной полосы 21,53 Гц.

Как видно из графиков, изображенных на рисунке 70, спектральная картина шума процесса выпуска не изменяется с течением времени, несмотря на значительные колебания крюкового усилия.

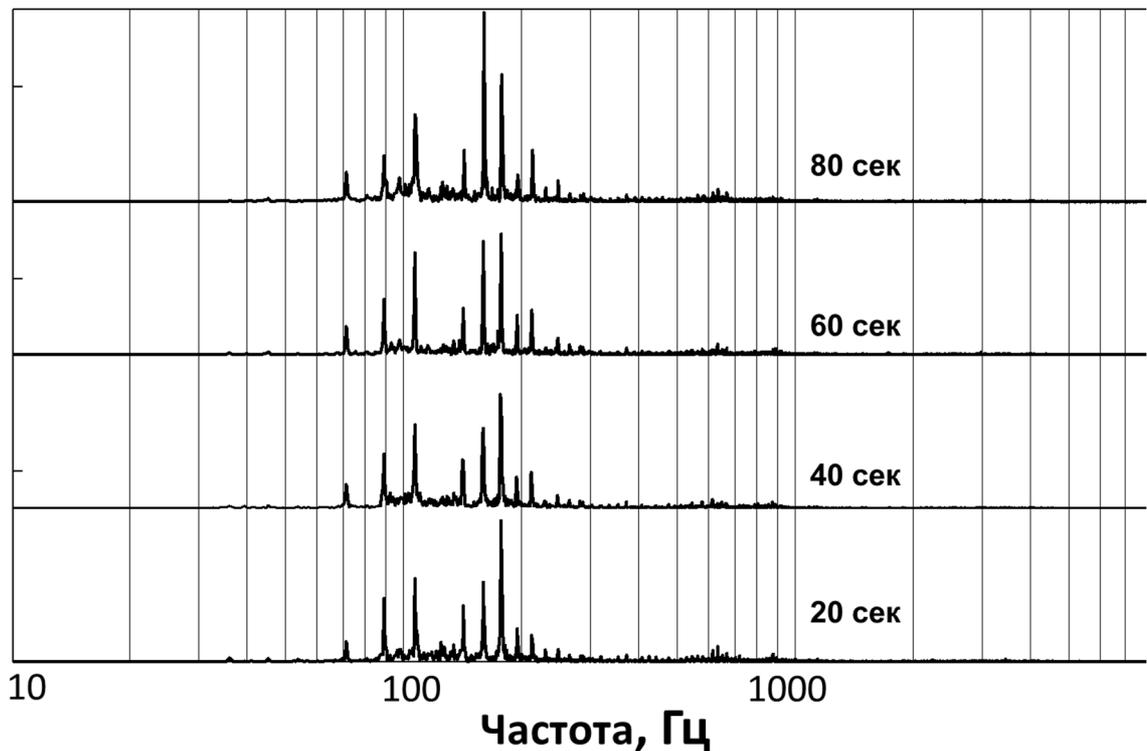
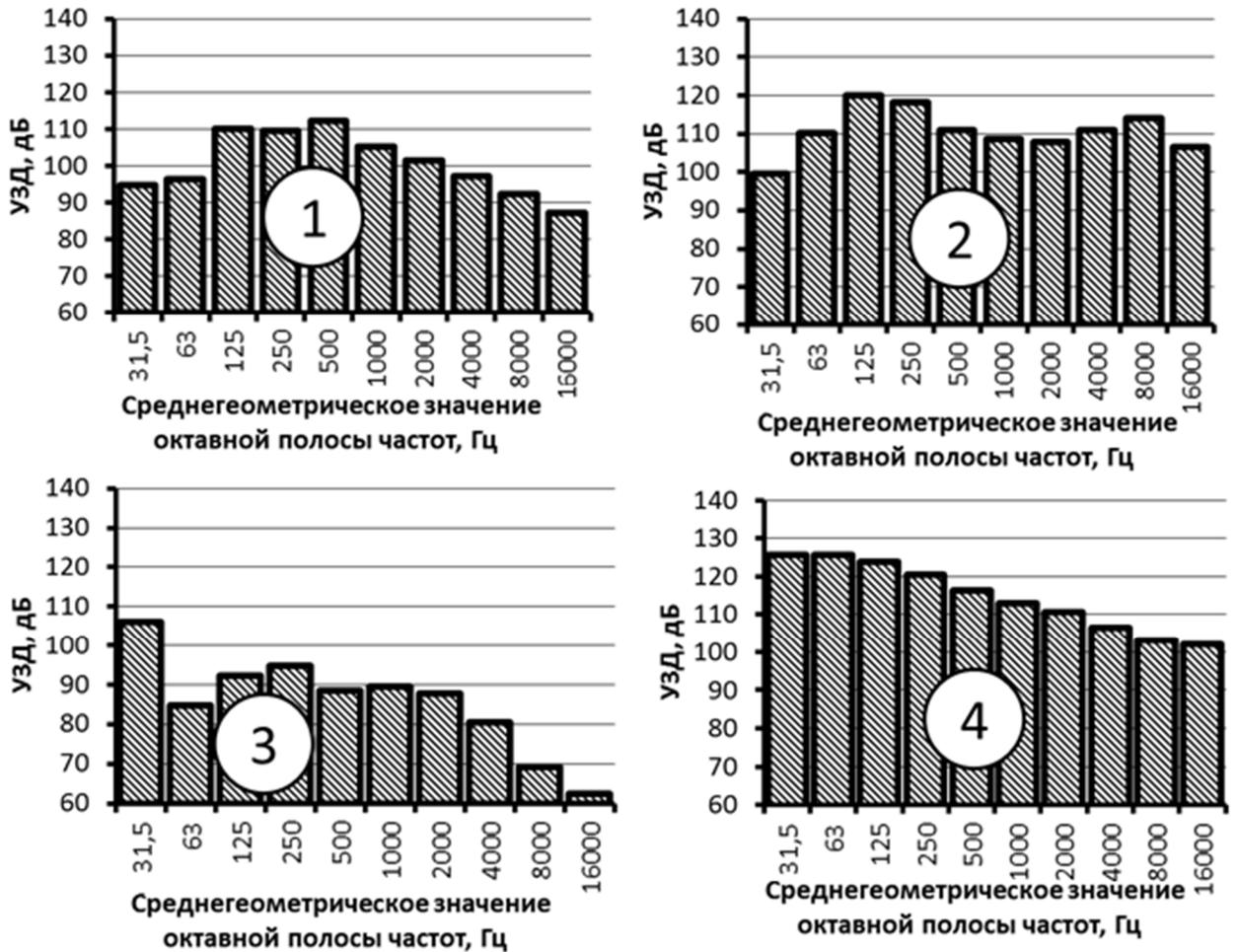


Рисунок 70 – Узкополосный спектр сигнала шума процесса выпуска в различные моменты времени

Кроме этого, на рисунке 70 видно, что основная мощность шума выпуска лежит в диапазоне низких частот до 500 Гц. Из полученных спектров методом энергетического суммирования и с использованием полученных для каждого микрофона передаточных коэффициентов были рассчитаны октавные спектры, представленные на рисунке 71.



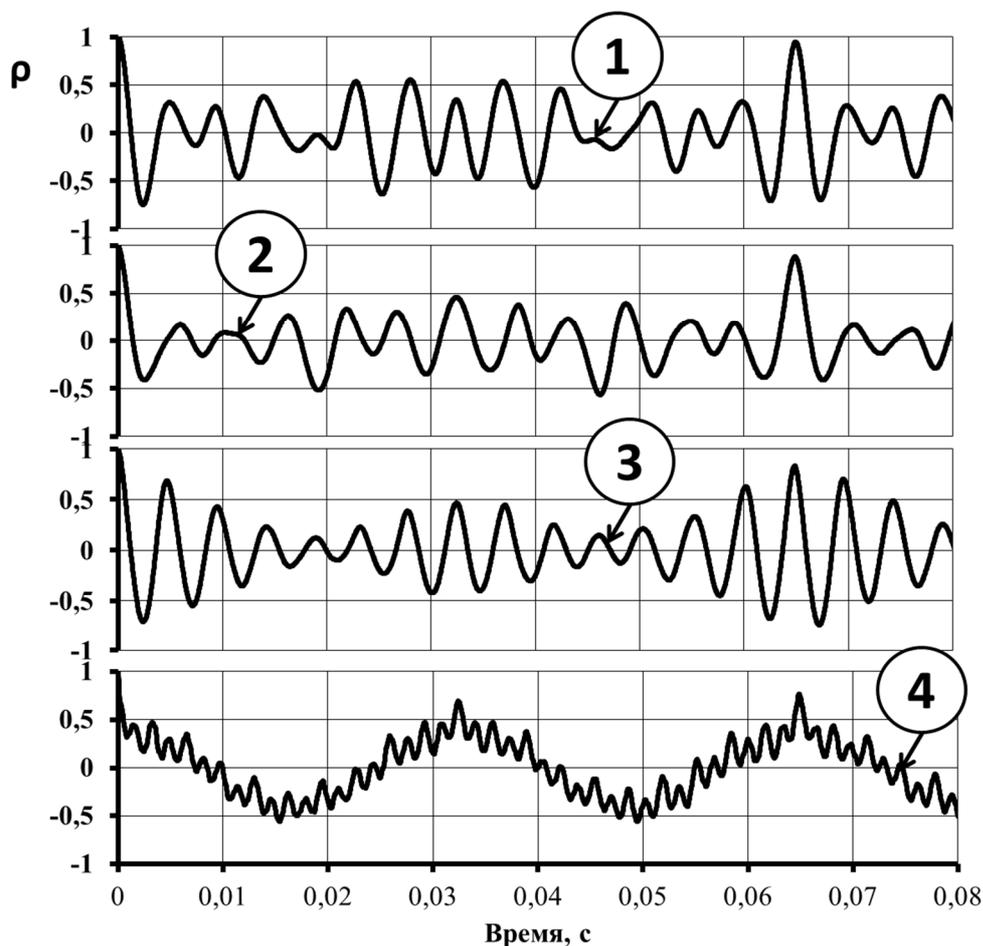
1 – шум впуска; 2 – шум выпуска; 3 – внутренний шум; 4 – корпусный шум.

Рисунок 71 – Октавные спектры шума источников при использовании трубы

Как видно из графиков, общая картина спектров весьма сходна. Можно выделить наибольшее сходство низко- и среднечастотной части октавных спектров шума внутри кабины (1) и шума процесса выпуска (2). Разница составляет около 22 дБ.

Как видно из представленного на рисунке 71 спектра шума внутри кабины (3) на октавной полосе частот со среднегеометрической частотой 31,5 Гц имеется пик, соответствующий основной частоте работы двигателя, превышающий ПС-75, установленный санитарными нормами для данного типа машин. Этот пик обусловлен гармоникой, хорошо просматриваемой в автокорреляционной функции шума процесса выпуска (Рисунок 68, линия 1). Снижение амплитуды данной гармоники позволит значительно уменьшить шумовое поле внутри кабины и улучшить комфортность труда оператора.

Результаты полевых испытаний агрегата Беларус-1221+ПЛН-4-35 аналогичны результатам, полученным при тяговых испытаниях. Автокорреляционные функции говорят о стационарности шума процесса выпуска (Рисунок 72), несмотря на значительные колебания крюкового усилия, создаваемого орудием.



1 – процесс выпуска ОГ; 2 – процесс впуска свежего заряда; 3 – шум корпуса двигателя; 4 – шум внутри кабины

Рисунок 72 – Автокорреляционные функции сигналов, полученных при полевых испытаниях

Взаимокорреляционные функции между шумом основных источников трактора и шумом внутри кабины указывают на преобладающее влияние шума процесса выпуска ОГ на сформированное в кабине звуковое поле. Данные функции обладают значительным сходством с функциями, представленными на рисунке 69, поэтому они не приводятся.

Исходя из указанных выше свойств сигнала процесса выпуска, таких как стационарность при значительном размахе колебаний крюкового усилия и выраженный инфра- и низкочастотный характер, делаем вывод что наиболее перспективным способом борьбы с шумом внутри кабины является использование в глушителе САШ. Это обусловлено высокой эффективностью данного типа систем при снижении шума в обозначенных диапазонах частот.

В приложении Ж на рисунках 81 – 86 представлены обобщенные октавные спектры внешнего и внутреннего звуковых полей трактора при различной степени загрузки двигателя и при использовании полый трубы, серийного и опытного глушителей, полученные при тяговых испытаниях. Характеристики внешнего звукового поля фиксировалось шумомером «Октава-110А». Кроме этого, в таблицах 21-26 приложения Ж представлены результаты расчетов октавных спектров, по которым построены данные графики.

Как видно из представленных рисунков, в спектре внешнего шума трактора преобладают низкочастотные компоненты до 500 Гц. Влияние степени загруженности двигателя отчетливо наблюдается также в этом диапазоне частот. При возрастании крюкового усилия от 0 до 34 кН для всех типов глушителей характерно увеличение УЗД на 5-15 дБ. При этом в средне- и высокочастотном диапазоне устойчивой взаимосвязи не наблюдается.

На УЗД в октавных полосах частот внутри кабины нагрузка не оказывает серьезного влияния. Колебания УЗД составляют ~3дБ от среднего значения для всех испытаний.

Усредненные результаты замеров УЗД в кабине трактора при полевых испытаниях показаны на рисунках 73-74. Кроме этого, на рисунках представлен предельный спектр (ПС) 75, устанавливаемый санитарными нормами в качестве допустимого для работы механизаторов.

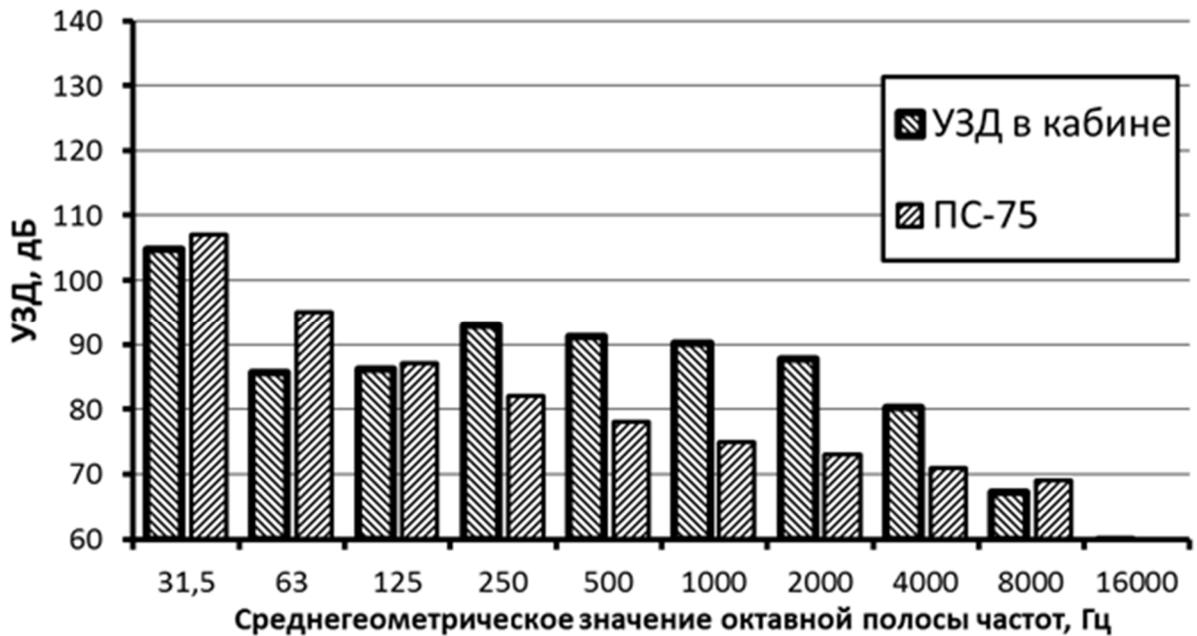


Рисунок 73 – УЗД в кабине трактора во время полевых испытаний при использовании СГШ

Из рисунка 74 видно, что для октавных полос со среднегеометрическими частотами от 250 до 4000 Гц наблюдается устойчивое превышение УЗД, устанавливаемых санитарными нормами.

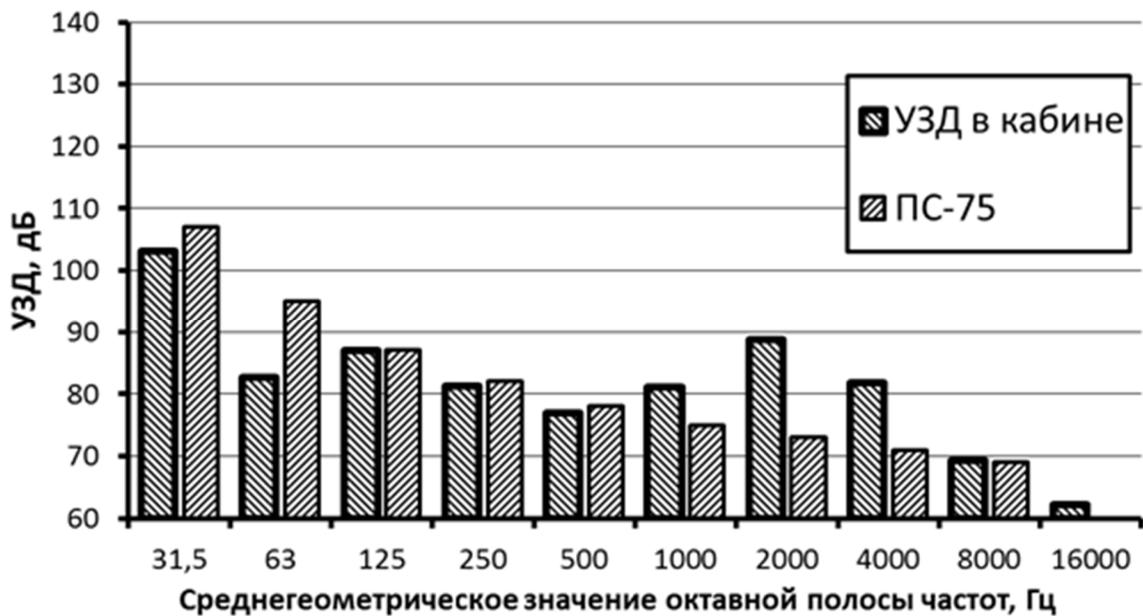


Рисунок 74 – УЗД в кабине трактора во время полевых испытаний при использовании ГШАТ

При этом из рисунка 74 видно, что для зоны низких частот ГШАТ эффективно снижает УЗД до устанавливаемых ПС-75 значений. Но в зоне сред-

них частот также наблюдается несоответствие санитарным нормам. Это означает необходимость применения новых, более современных способов снижения внутреннего шума.

Из представленных в приложении Ж графиков видна эффективность применения активного глушителя в диапазоне низких частот. Уровни внешнего шума в этой части спектра ниже, чем у серийного, в среднем на 7 - 11 дБ, внутреннего – на 3 - 5 дБ. Более детальную информацию об эффективности ГШАТ могут дать сигналы, записанные микрофоном, расположенным близи среза выхлопной трубы глушителя.

Расчитанные уровни внешнего шума выпуска, при различных нагрузках представлены на рисунках 87 – 90 приложения И. Эффективность применения ГШАТ и СГШ при наиболее значимых вариантах загрузки двигателя представлена на рисунках 91-94 приложения И.

В таблице 16 производится обобщение полученных значений эффективности глушителей и их сравнение.

Таблица 16 – Сравнение акустической эффективности серийного и опытного глушителей шума

Полоса, Гц	Эффективность серийного глушителя, дБ					Эффективность ГШАТ, дБ				
	0 кН	3,3 кН	10,1 кН	34,1 кН	Среднее	0 кН	3,3 кН	10,1 кН	34,1 кН	Среднее
31,5	11,4	10	10	12,3	10,9	21,8	22	19,3	16,9	20
63	13,9	13,1	13,1	10,4	12,6	21,3	22,7	21,1	16,5	20,4
125	14,7	15,7	15,7	18,4	16,1	24,1	24,6	25,6	21,4	23,9
250	17,4	16,8	16,8	14,3	16,3	23,8	22,8	21,4	17,6	21,4
500	12,3	11,2	11,2	13,8	12,1	15,5	14,3	13,1	14,1	14,3
1000	11,3	9,9	9,9	12	10,8	9,5	10,9	8,6	7,7	9,2
2000	10,8	9,4	9,4	8,3	9,5	8,8	8,9	7,6	9,5	8,7
4000	16,3	17,2	17,2	14,4	16,3	13,1	12	10,1	8	10,8
8000	17,4	16,2	16,2	15,1	16,2	14,1	12,8	12,3	7,3	11,6
16000	20,8	20,5	20,5	18,4	20,1	13,9	14,5	11,9	6,6	11,7

Как видно из результатов, представленных в таблице, на низких частотах эффективность ГШАТ в среднем на 6 дБ выше. При этом, чем ниже по-

лоса частот, тем разница значительнее, на полосе 31,5 Гц она составляет ~10 дБ.

В диапазоне высоких частот от 4 кГц и выше, эффективность применения ГШАТ ниже, чем у серийного в среднем на 7 дБ. Это объясняется простотой конструкции глушителя и отсутствием сложного лабиринтного строения для движения потока ОГ.

Низкая эффективность в диапазоне высоких частот опытного глушителя практически не влияет на внутреннее поле в кабине и внешнее (на расстоянии 7,5 м) звуковое поле, так как волны этого диапазона отлично поглощаются при распространении в воздушной среде и при проникновении через материалы. Это подтверждается низкими уровнями звукового давления для высших полос частот (Рисунки 79, 80, 82 и 83).

Проверка соответствия акустической эффективности ГШАТ, полученной при испытаниях и рассчитанной согласно изложенной во 2-й главе диссертации методике, представлена в таблице 17.

Таблица 17 – Проверка адекватности разработанной методики

Полоса, Гц	Эффективность, достигнутая при испытаниях, средняя для полосы, дБ	Эффективность, прогнозируемая аналитическими расчетами, дБ	Абсолютная ошибка, дБ	Относительная погрешность расчета, %
31,5	20	19,6	0,4	2
63	20,4	19,3	1,1	5,4
125	23,9	23,8	0,1	0,4
250	21,4	20,9	0,5	2,3
500	14,3	14,4	-0,1	-0,7
1000	9,2	10,2	-1	-10,9
2000	8,7	8,8	-0,1	-1,1
4000	10,8	8,7	2,1	19,4
8000	11,6	7,5	4,1	35,3
16000	11,7	7	4,7	40,2

Из таблицы видно, что в области средних и низких частот математическая модель описывает эффективность глушителя с достаточно высокой степенью точности, максимальная абсолютная погрешность составляет 1,1 дБ.

В высокочастотной области погрешность существенна и превышает 4,7 дБ. Причем эффективность значительно выше прогнозируемой для данного диапазона. Это говорит о необходимости совершенствования методики расчета ГШАТ в данном диапазоне частот.

Уровень шума в кабине на частотах до 500 Гц снижается на 3-5 дБ при использовании опытного глушителя шума, а в средне- и высокочастотном диапазоне значительных различий не наблюдается.

#### 4.6 Выводы

1. По результатам лабораторных испытаний адаптивного блока управления были подобраны параметры алгоритма, заложенного в блок управления: тип алгоритма – FxLMS, число весовых коэффициентов фильтра – 128, частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя – 8 кГц, значение фактора сходимости 0x15FA. Эти параметры обеспечивают наивысшую скорость сходимости для различных сигналов, а также устойчивость алгоритма. Кроме этого, выявлена необходимость применения низкочастотных фильтров для сигналов от микрофонов, так как это значительно увеличит устойчивость алгоритма и ускорит его схождение.

2. Согласно полученным взаимокорреляционным функциям наибольший вклад в формирование звукового поля внутри кабины оказывает шум процесса выпуска, его доля составляет около 45 %. При этом взаимосвязь между звуковым полем внутри кабины и звуковым полем вблизи среза выпускной трубы устойчивая, что подтверждается её периодичностью. Следовательно, для тракторов наиболее актуальна борьба с шумом процесса выпуска.

3. Согласно проведенным экспериментам предложенная математическая модель с достаточно высокой степенью точности описывает рабочий процесс опытной конструкции ГШАТ. Наиболее значительные расхождения наблюдаются в высокочастотном диапазоне выше 4 кГц и достигают 4,7 дБ.

4. Сравнительная оценка эффективности применения серийного и опытного глушителей шума показала, что предлагаемая конструкция позволяет снизить в октавных полосах низкочастотного диапазона внутренний шум в кабине в среднем на 3 - 5 дБ, для внешнего - на 7 - 11 дБ. При этом в средне- и высокочастотном диапазоне заметной разницы не наблюдается.

5. Проведение испытаний по определению аэродинамических потерь давления показало, что для серийного и опытного образцов глушителей при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя характерны потери давления соответственно 4,41 и 1,39 кПа. При этом среднее значение относительного противодавления СГШ составляет 2875,4 %, в то время как для ГШАТ лишь 964,3 %. Развиваемые потери давления ГШАТ близки к рассчитываемым по предлагаемой математической модели, относительная погрешность не превышает 17,2 %.

## **5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛУШИТЕЛЕЙ ШУМА АКТИВНОГО ТИПА**

### **5.1 Определение экономических показателей использования глушителей шума активного типа**

Проведенные исследования показали повышенную эффективность применения глушителя шума ГШАТ, а также его пониженное аэродинамическое сопротивление относительно СГШ. Это означает, что в такте выпуска, когда поршень выталкивает из цилиндра ОГ, снижаются потери энергии, необходимой для данного процесса. Это приводит к некоторому увеличению эксплуатационной мощности двигателя и, как следствие, снижению удельного расхода топлива.

Этот факт предопределяет возможность экономии топлива при эксплуатации трактора Беларусь -1221. Так как сложно оценить экономический эффект от основного последствия применения ГШАТ – повышения экологических показателей трактора и улучшения условий труда операторов, выясним экономическую целесообразность применения ГШАТ, основываясь лишь на сниженном его противодавлении.

Экономические показатели по специализированной технике на отдельных технологических операциях определяют в расчете на единицу наработки по ГОСТ 53056-2008 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки» и ГОСТ 23729-88 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки универсальных машин и технологических комплексов» [26].

Исходя из данных, представленных в работе [16], зависимость между относительным приращением удельного расхода топлива и аэродинамическим сопротивлением для двигателей одного семейства с рассматриваемым нами графически представлена на рисунке 75.

Снижение удельного расхода топлива для всех исследованных нами частот происходит в среднем на 1,5 % относительно СГШ.

Однако наряду с положительным экономическим эффектом применения опытного глушителя шума, связанным со снижением среднего расхода топлива,

имеется и отрицательный, так как его использование влечет увеличение балансовой стоимости трактора.

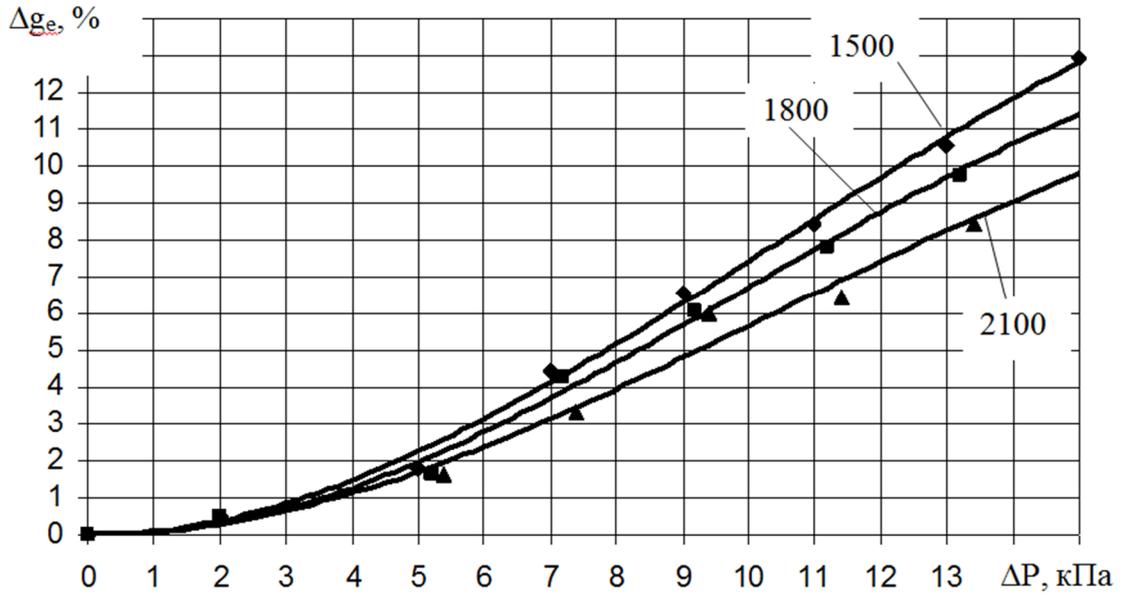


Рисунок 75 – Зависимости относительного увеличения удельного расхода топлива от сопротивления в выпускной системе дизеля Минского тракторного завода

Расчет экономической эффективности от применения ГШАТ осуществляется по известным методикам [24, 26].

Критерием сравнительной экономической эффективности новой разработки является годовой экономический эффект

$$\text{Эи}_2 = \left( \frac{И_{г1}}{Q_{г1}} - \frac{И_{г2}}{Q_{г2}} \right) \cdot Q_{г2}, \quad (60)$$

где  $\text{Эи}_2$  – годовой экономический эффект, руб.;

$И_{г1}, И_{г2}$  – эксплуатационные издержки за год использования трактора, оборудованного серийным и опытным вариантом глушителя шума.

$Q_{г1}, Q_{г2}$  – объем работ, совершаемых трактором, оборудованным серийным и опытным вариантом глушителя шума.

Эксплуатационные издержки за год определяются следующим образом:

$$И_2 = 3 + OT + P_m + A_m, \quad (61)$$

где  $OT$  – оплата труда обслуживающего персонала, руб.;

$\Gamma$  – стоимость горючего и смазочных материалов или других энергоносителей, руб.;

$P_m$  – затраты на техническое обслуживание, капитальный и текущий ремонт, хранение по трактору Беларус-1221, руб.;

$A_m$  – амортизационные отчисления по трактору Беларус-1221, руб.;

Оплата труда вычисляется из следующей формулы:

$$OT = Y_{опл.} \cdot T_{вр.раб}, \quad (62)$$

где  $Y_{опл.}$  – часовая ставка тракториста, руб/м.час;

$T_{вр.раб}$  – затраты рабочего времени, м.час.

Стоимость горючего и смазочных материалов или других энергоносителей определяется из следующего выражения:

$$\Gamma = R_г \cdot S \cdot Ц_T, \quad (63)$$

где  $R_г$  – расход топлива на единицу работы, кг/ч;

$S$  – время потребное для выполнения объема работ, ч;

$Ц_T$  – комплексная цена горючего, руб./кг.

Годовые затраты на амортизацию в год

$$A_m = CT \cdot a, \quad (64)$$

где  $CT$  – балансовая стоимость трактора, руб.;

$a$  – норма отчислений на амортизацию, %;

Годовые затраты на ТР, ТО и хранение

$$P_{мс} = CT \cdot b, \quad (65)$$

где  $b$  – норма отчислений на ТР, ТО и хранение, %;

Экономический эффект за срок службы, учитывающий ежегодный эффект и возрастание его по годам по формуле сложных процентов, определяется по следующей формуле:

$$K_t = Э_{и_г} \times \frac{(1 + NS)^T - 1}{NS}, \quad (66)$$

где  $NS$  – коэффициент, отражающий учетную годовую ставку процента по кредитам банка или вкладу в банк ( $NS = 0,14$ );

$T$  – срок службы объекта, г.

Среднегодовой коэффициент эффективности вложений находится следующим образом:

$$E_t = T \sqrt{\frac{K_t}{K_0}} - 1, \quad (67)$$

где  $K_0$  – стоимость дополнительных капиталовложений, руб.

Срок окупаемости дополнительных капиталовложений определяется по довольно сложной формуле:

$$T_{ок} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{K_0 \cdot NS}{K_t}\right)}{\ln(1 + NS)} \quad (68)$$

Расчет себестоимости изготовления ГШАТ и переоборудования трактора Беларус-1221 приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Затраты на дополнительные капитальные вложения

Показатели	Кол-во.	Цена, руб.	Стоимость, руб.
1. Материалы, узлы, детали			
Лист 1,5×380×1350 ГОСТ 19903-74/ Сталь 0,3X18Н11 ГОСТ 1577-93	1	850	850
Стандартные крепежные изделия (болты, винты, гайки)		350	350
Динамик 25ГДШ-2Н	1	700	700
Микрофон МКЭ-3	2	100	200
Электроды Э-46Т	1 кг	300	300
Блок управления	1	12000	12000
Монтажные провода	20 м	70	1400
Уплотнитель проводов	4	10	40
Круг 25×50ст3 ГОСТ2590-88	1	200	200
Другие элементы		400	400

Показатели	Кол-во.	Цена, руб.	Стоимость, руб.
2. Затраты на изготовление и монтаж			
Монтажные работы, чел.-час.	2,5	58	145
Слесарные работы, чел.-час.	4,8	68	326,4
Сварочные работы, чел.-час.	5,3	84	445,2
3. Итого прямых затрат			17356,6
4. Накладные и прочие расходы (15%)			2603,49
Всего затрат на изготовление и монтаж			19960,1

Исходные данные, необходимые для расчета экономической целесообразности приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Исходная информация для экономической оценки

Показатели	Базовый вариант	Опытный вариант
1. Количество обслуживающего персонала, чел.	1	1
2. Балансовая стоимость трактора Беларусь-1221, руб.	1800000	1819960,1
3. Дополнительные капиталовложения, руб.	-	19960,1
4. Годовая наработка Беларусь-1221, ч	1960	1960
5. Комплексная цена 1л дизельного топлива, руб.	32	32
6. Срок службы объекта (Беларус-1221), лет	11	11
7. Нормы эксплуатационных издержек:		
- часовая ставка оплаты труда, руб/ч	126	126
- амортизационные отчисления (Беларус-1221), %	9,1	9,1
- отчисления на ТО, ремонт и т.д. (Беларус-1221), %	12	12
- расход топлива, кг/ч	21,5	21,18

Результаты расчета экономической эффективности обобщены в таблице 20.

Таблица 20 – Сводные результаты расчета экономической эффективности применения ГШАТ

Показатели	Базовый вариант	Опытный вариант
1. Балансовая стоимость, руб.	1800000	1819960,1
2. Дополнительные капиталовложения, руб.		19960,1
3. Годовая загрузка, ч	1960	1960
6. Годовой экономический эффект, руб.		15858,8
7. Экономический эффект за срок службы, руб.		365458,8
8. Коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений		0,33
9. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет		1,48

## 5.2 Выводы

1. Расчет экономической эффективности применения ГШАТ на тракторе Беларус-1221 показал целесообразность замены СГШ. Эффективность достигается за счет снижения удельного расхода топлива трактором из-за меньшего противодействия глушителя.

2. Расчет затрат на изготовление и монтаж опытной конструкции ГШАТ показал, что себестоимость предлагаемой конструкции составляет 19 960,1 руб.

3. Годовой экономический эффект от внедрения опытного глушителя шума на один трактор составляет 15 858,8 руб., а срок окупаемости капитальных вложений – 1,48 года, то есть ниже срока службы трактора.

4. Социальный эффект от применения ГШАТ заключается в улучшении комфортности труда механизатора, за счет снижения внутреннего шума на 3-5 дБ в октавных полосах частот средне- и низкочастотного диапазона. Этот факт оказывает положительное влияние на производительность и качество их труда. Кроме этого, снижение внешнего шума на 7-11 дБ для низких и средних октавных полос частот влечет за собой улучшение условий труда других категорий работников, непосредственно взаимодействующих с данной техникой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышение энергонасыщенности и скорости движения современной тракторной техники оказывает негативное влияние на комфортность рабочего места тракториста. Анализ акустических характеристик тракторов сельскохозяйственного назначения показал, что наиболее интенсивным источником шума является процесс выпуска отработавших газов. Уровни звукового давления, развиваемые данным источником, превышают 130 дБ в полосах частот средне- и низкочастотного диапазона.

2. Разработанная методика определения эффективности глушителя шума, использующего САШ с одним фронтальным динамиком, позволила с высокой степенью точности спрогнозировать эффективность опытного образца в низко- и среднечастотном диапазоне. Основным отличием данной методики от имеющихся является последовательное произведение расчетов как в частотной, так и во временной областях. Для уточнения результатов расчетов в высокочастотной области целесообразно применить другие методы расчетов, используемые для прогнозирования эффективности глушителей пассивного типа.

3. Разработанный алгоритм поиска геометрических параметров, обеспечивающих наибольшую эффективность при использовании ГШАТ позволил выявить наиболее рациональные параметры опытного образца глушителя:

$$\begin{array}{llll} r_{\text{корп}} = 0,075 \text{ м}; & l_{\text{вх}} = 0,4 \text{ м}; & r_{\text{расш}} = 0,105; & l_{\text{расш1}} = 0,25; \\ l_{\text{расш2}} = 0,2 \text{ м}; & l_{\text{суж}} = 0,09 \text{ м}; & r_{\text{вых}} = 0,035; & l_{\text{вых}} = 0,2 \text{ м}; \end{array}$$

4. Полученная зависимость, связывающая параметры глушителя с противодействием, позволила определить рациональный радиус  $r_{\text{расш}} = 0,13 - 0,15$  м расширительной части глушителя с одним фронтальным динамиком, обеспечивающий снижение противодействия.

5. Предложено новое техническое решение по реализации ГШАТ для автотракторных двигателей (патент № 2445505).

6. По результатам лабораторных испытаний адаптивного блока управления были подобраны рациональные параметры алгоритма, заложенного в блок управ-

ления: тип алгоритма – FxLMS, число весовых коэффициентов фильтра – 128, частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя – 8 кГц, значение фактора сходимости – 5626.

7. По результатам тяговых и полевых испытаний выявлено, что наибольший вклад в формирование звукового поля внутри кабины трактора оказывает шум процесса выпуска, его доля составляет около 45%. Предлагаемая конструкция глушителя шума позволяет снизить в октавных полосах низкочастотного диапазона внутренний шум в кабине в среднем на 3 - 5 дБ, для внешнего - на 7 - 11 дБ.

8. Расчет экономической эффективности применения предлагаемой конструкции ГШАТ показал, что годовой экономический эффект составляет 15 858,8 руб., а срок окупаемости дополнительных капитальных вложений - 1,48 года. Социальный эффект от применения ГШАТ заключается в улучшении комфортабельности труда механизатора за счет снижения внутреннего шума на 3-5 дБ в октавных полосах частот средне- и низкочастотного диапазона.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АПК	Агропромышленный комплекс
БУ	Блок управления
ВВП	Внутренний валовый продукт
ГШАТ	Глушитель шума активного типа
ДВС	Двигатель внутреннего сгорания
ИАЗ	Источник антизвука
МЭС	Мобильные энергетические средства
ОГ	Отработавшие газы
ПС	Предельный спектр
САШ	Система активного шумоподавления
СГШ	Серийный глушитель шума
СДМ	Строительно-дорожные машины
СКО	Среднеквадратическое отклонение
СХМ	Сельскохозяйственная машина
УЗ	Уровни звука
УЗД	Уровни звукового давления
FxLMS	Fixed-x least mean square, фиксированный по x метод наименьших квадратов
leaky-LMS	Метод наименьших квадратов с утечками
LMS	Least mean square, метод наименьших квадратов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобили и тракторы. Основы эргономики и дизайна: учебник для студентов вузов / И. С. Степанов, А. Н. Евграфов, А. Л. Карунин, В. В. Ломакин, В. М. Шарипов; Под общ. ред. В. М. Шарипова.– М.: МГТУ «МАМИ», 2002.– 230 с.
2. **Адайлех, В. М.** Внешний шум легкового автомобиля и возможности его снижения: дис. ... канд. техн. наук / В. М. Айдальех.– Волгоград, 2000.– 142 с.
3. Адаптивные фильтры; пер. с англ. / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна и П. М. Гранта.– М.: Мир, 1988.– 392 с.
4. Акустика: справочник / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров; под ред. М. А. Сапожкова.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Радио и связь, 1989.– 336 с.
5. **Алексеев, С. П.** Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении / С. П. Алексеев, А. М. Казаков, Н. Н. Колотилов.– М.: Машиностроение, 1970.– 208 с.
6. **Алексеевко, В. А.** Жизнедеятельность и биосфера / В. А. Алексеев.– М.: Логос, 2005.– 232 с.
7. Аэрогидромеханический шум в технике / Отв. ред. Хиклинг Р.–М.: Мир.– 1980.– 336с.
8. **Бабасова, Е. М.** Активные методы гашения звуковых полей / Е. М. Бабасова, М. П. Завадская, Б. Л. Энгельский.– Л.: ЦНИИ «Румб», 1982.– 54 с.
9. **Баженов, Д. В.** Эффективность работы реактивных глушителей шума в воздуховодах конечных размеров/ Д. В. Баженов, Л. А. Баженова, А. В. Римский-Корсаков // Акустический журнал.– 1995.–Т. 41, № 1.–С. 22-26.
10. **Балишанская, Л. Г.** Техническая акустика транспортных машин: справочник / Л. Г. Балишанская, Л. Ф. Дроздова, Н. И. Иванов и др.; под ред. Н. И. Иванова.– СПб.: Политехника, 1992.– 365 с.
11. **Бангоян, Э. Г.** Разработка методов и средств снижения шума выпуска дизелей автопогрузчиков (на примере дизеля автопогрузчика ДВ-1792М): дис. ... канд. техн. наук / Э. Г. Бангоян.– М., 2007.– 269с.

12. **Белоцерковский, С. В.** Автомобильные глушители: современные требования, тенденции развития, методы расчета и испытаний / С. В. Белоцерковский, В. Е. Тольский // Электронный журнал «Техническая акустика».- М., 2001, №1.- Режим доступа: <http://www.ejta.org>, свободный.– Заглавие с экрана.
13. **Белякин, С. К.** Разработка метода акустического расчета комбинированных глушителей шума транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук / С. К. Белякин.– Курган, 2000.– 189с.
14. **Бесько, В. А.** Структура факторов профессиональной заболеваемости в Воронежской области [Электронный ресурс] / В. А. Бесько // Научно-медицинский вестник Центрального Черноземья: интернет-журнал, Воронеж, 2006.– № 25.– Режим доступа: [http://www.vзма.ac.ru/publ/vest/025/Site/index\\_2.html#34](http://www.vзма.ac.ru/publ/vest/025/Site/index_2.html#34), свободный.– Заглавие с экрана.
15. **Бобров, В. Ф.** Комфорт на рабочем месте: излишество или выгода? [Электронный ресурс] / В. Ф. Бобров, В. С. Соловьев.– Режим доступа: <http://www.vibris.ru/a1.htm>, свободный.– Заглавие с экрана.
16. **Божко, А. В.** Снижение вредных выбросов дизельных двигателей мобильных энергетических средств за счёт применения фильтра-нейтрализатора отработавших газов: дис. ... канд. техн. наук / А. В. Божко.– Воронеж, 2007.– 151 с.
17. **Васильев, А. В.** Снижение низкочастотного шума и вибраций энергетических установок: дис. ... д-ра техн. наук / А. В. Васильев.– Тольятти, 2006.– 659с.
18. **Васильев, Б. П.** Акустический импеданс открытого торца цилиндрической трубы / Васильев, Ф. Ф. Легуша, К. В. Невеселова// Сборник статей по материалам XXVII сессии Российского акустического общества, посвященная памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А. В. Смольякова и В. И. Попкова, Санкт-Петербург 16-18 апреля 2014 г.– СПб.: Изд. РАО, 2014.– С.5.
19. **Ватсон, Г. Н.** Теория Бесселевых функций / Г. Н. Ватсон.– М.: ГИТТЛ, 1949.– 801 с.

20. **Владимиров, В. С.** Уравнения математической физики: учебник для вузов / В. С. Владимирова, В. В. Жаринов.– 2-е изд., стереотип.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.– 400 с.
21. **Гавриченко, А. И.** Условия труда и заболеваемость сельских механизаторов / А. И. Гавриченко, Г. П. Васильев // Техника и оборудование для села.– 1999.– №7.– С. 21-22.
22. **Гетьман, Н. И.** Оценка условий труда механизаторов / Н. И. Гетьман, А. В. Калюжный, И. Э. Липкович // Механизация и электрификация сельского хозяйства.– 2001.– №7.– С.23-28.
23. **Гильман, Л. С.** Снижение уровня шума, возникающего в процессе выпуска дизелей / Л. С. Гильман.– Дис. канд. техн. наук.– Харьков, 1984.– 176 с.
24. Глушитель шума активного типа для автотракторных двигателей. Патент №2445505 Россия, МПК F02 M35/12, Поливаев О. И., Кузнецов А. Н., №2010131485/06; заявл. 27. 04. 2010; опубл. 20. 03. 2012. Бюл. №8.–5с.
25. **Горланов, С. А.** Экономическая оценка проектных разработок в АПК: Учебно-методическое пособие.– Часть 1. Методические указания / С. А. Горланов, Е. В. Злобин.– Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГАУ, 2002.– 66с.
26. ГОСТ 53056-2008 Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки.– Введен впервые; введ. 17. 12. 2008. дейст.– М.: Стандартинформ, 2010.– 24с.
27. ГОСТ 12. 0. 003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.– Введ. 01. 01. 76 дейст.– М.: Изд-во стандартов, 1976 – 4с.
28. ГОСТ 12. 0. 004-90 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения.– Взамен ГОСТ 12. 0. 004-79; введ. 01. 07. 1991 дейст.– М.: Стандартинформ, 2010 – 26с.
29. ГОСТ 12. 1. 003 – 83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.– Взамен ГОСТ 12. 1. 003-76; введ. 01. 07. 84. дейст.– М.: Изд-во стандартов, 2002 – 25с.
30. ГОСТ 51920-2002 Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Внешний шум. Нормы и методы оценки.– Введен впервые; введ. 12. 07. 2002. дейст.– М.: Изд-во стандартов, 2002.– 7с.

31. ГОСТ 7057-2001 Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний.– взамен ГОСТ 7057-81; введ. 27. 05. 2002. дейст.– М.: Изд-во стандартов, 2002 – 11с.
32. **Гутин, Л. Я.** О звуковом поле поршневых излучателей/Л. Я. Гутин // Журнал технической физики.–1937.–Т. 7,№ 10.– С. 1096-1106.
33. **Джиган, В. Н.** Многообразие алгоритмов адаптивной фильтрации по критерию наименьших квадратов/ В. Н. Джиган // Современная электроника.- 2008.– №3.– С. 32-39
34. **Дзоценидзе, Т. Д.** Эргономика и дизайн автомобилей и тракторов : учебное пособие / Т. Д. Дзоценидзе, А. Г. Левшин . - М.: Металлургиздат, 2010 . - 205 с.
35. **Дорофеев, И. Н.** Безопасность жизнедеятельности в АПК России: состояние и тенденции / И. Н. Дорофеев, В. М. Михайлов, В. П. Паракин, В. И. Попадейкин // Охрана труда и техника безопасности в сельском хозяйстве.– 2006.– №7.– С. 9-11.
36. **Дорохов, А. С.** Повышение эффективности входного контроля качества запасных частей и сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. С. Дорохов.– М., 2011.– 40 с.
37. **Дробаха, М. Н.** Снижение внешнего шума транспортных машин глушителями (на примере трактора МТЗ-82): дис. ... канд. техн. наук / М. Н. Дробаха.– СПб., 2004.– 148 с.
38. **Елисеев, А. Н.** Кто есть кто на российском рынке колесных тракторов / А. Н. Елисеев // Аграрное обозрение.– 2010.– №1.–С. 30-39.
39. **Загородных, А. Н.** Обеспечение безопасности транспортных средств в системе «объект – среда» / А. Н. Загородных, В. В. Шкрабак // Тракторы и сельскохозяйственные машины.– 2005.– №9.–С. 47-49.
40. **Зинченко, В. И.** Шум судовых двигателей / Зинченко В. И.– Л.: Судпромгиз, 1957.– 258 с.
41. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга.– М.: Машиностроение, 1992.– 672 с.

42. **Иванов, Н. И.** Борьба с шумом и вибрацией на путевых и строительных машинах / Н. И. Иванов.– М.: Транспорт, 1987.– 223 с.
43. **Иванов, Н. И.** Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник.– М.: Университетская книга, Логос, 2008.– 424с.
44. **Иванов, Н. И.** Основы виброакустики: учебник для ВУЗов / Н. И. Иванов, А. С. Никифоров.– СПб.: Политехника, 2000.– 482 с.
45. **Исакович, М. А.** Общая акустика. учебное пособие / М. А. Исакович.– М.: Издательство «Наука», 1973.– 502с.
46. **Кане, А. Б.** Борьба с шумом всасывания дизелей / А. Б. Кане.– М.:Машиностроение, 1969.– 144 с.
47. **Кириллов, С. Н.** Оптимизация устройств цифровой обработки сигналов по комбинированному критерию среднего квадрата ошибки/ С. Н. Кириллов// Цифровая обработка сигналов.– 2000.– №1.– С. 27-32.
48. **Кирпичников, В. Ю.** К вопросу о выборе нормируемого параметра постоянного шума / В. Ю. Кирпичников, Л. Ф. Дроздова, И. М. Климкина, А. В. Кудаев // Безопасность жизнедеятельности.– 2007.– №7.– С. 19-23.
49. **Клюкин, И. И.** Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах / И. И. Клюкин.– Л.: Судостроение, 1971.– 416 с.
50. **Комкин, А. И.** Оптимизация реактивных глушителей шума/А. И. Комкин // Акустический журнал.– 2010.– №3(56).– С. 373-379.
51. **Комкин, А. И.** Оценка эффективности активных систем гашения шума выпуска двигателя внутреннего сгорания/ А. И. Комкин, Н. Ф. Бочаров, Л. Ф. Жеглов // Техническая акустика.– 1994.– Т. 3, вып. 3-4.- С. 9-11.
52. **Комкин, А. И.** Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей шума с требуемыми характеристиками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук/ А. И. Комкин.– М., 2012.– 48 с.
53. **Комкин, А. И.** Снижение шума активным методом / А. И. Комкин.– М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.- 24 с.
54. **Красильников, В. А.** Введение в акустику: учебное пособие. /В. А. Красильников.– М.: Изд-во МГУ, 1992.– 152 с.

55. **Круг, П. Г.** Процессоры цифровой обработки сигналов: Учебное пособие/П. Г. Круг.– М.: Издательство МЭИ, 2001.– 128 с.
56. **Кузнецов, А. Н** Активное подавление шума процесса выпуска отработавших газов мобильных энергетических средств/ А. Н. Кузнецов, О. И. Поливаев// Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов.– Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГАУ, 2014.–Ч. 3.– С. 77-84.
57. **Кузнецов, А. Н** Перспективы использования систем активного шумоподавления / А. Н. Кузнецов, О. И. Поливаев // Вестник ВГАУ.– 2010.– №1(24).– С. 46-48.
58. **Лепендин, Л. Ф.** Акустика: учебное пособие для ВТУЗов / Л. Ф. Лепендин.– М.: Высшая школа, 1978.– 448с.
59. **Луканин, В. Н.** Двигатели внутреннего сгорания. В 3-х кн. Кн. 2. Динамика и конструирование / В. Н. Луканин, И. В. Алексеев, М. Г. Шатров, А. В. Павлов, Ю. В. Горшков, Н. И. Назаров, С. П. Ежов, Л. М. Матюхин, В. В. Синявский.– М.: Высшая школа, 2007.– 400 с.
60. **Луканин, В. Н.** Снижение шума автомобиля / В. Н. Луканин, В. Н. Гудцов, Н. Ф. Бочаров.– М.: Машиностроение, 1981.–158 с.
61. **Луканин, В. Н.** Шум автотракторных двигателей внутреннего сгорания / В. Н. Луканин.– М.: Машиностроение, 1971.– 271 с.
62. **Макаревич, П. С.** Повышение технического уровня четырехтактных дизелей снижением скорости рабочего тела в проходных сечениях клапанов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / П. С. Макаревич.– Челябинск, 2006.– 224с.
63. **Марпл -мл., С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл.– М.: Мир, 1990.- 584 с.
64. **Месхи, Б. Ч.** Улучшение условий труда операторов комбайнов за счет снижения шума и вибрации: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б. Ч. Месхи.– Ростов-на-Дону, 2004.– 476с.

65. **Мокринский, А. В.** Методика комплексного снижения шума тепловых двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Мокринский.– Тольятти, 2003.– 214 с.
66. **Морз, Ф.** Колебания и звук/Ф. Морз.– М.: Гостехиздат, 1949.– 496 с.
67. **Наумов, А. В.** Совершенствование средств повышения экологической безопасности тракторов путем снижения уровня шума (на примере трактора «Кировец»): автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Наумов.– Саратов, 2011.– 143 с.
68. **Павлов, П. И.** Определение оптимальных параметров остекления кабины трактора / П. И. Павлов, А. В. Наумов // Вавиловские чтения – 2007 : матер. междунар. науч. – практ. конф.– Саратов: Научная книга, 2007.– С. 138–140.
69. **Павлов, П. И.** Оценка уровня шума на рабочем месте трактора К-701 / П. И. Павлов, А. В. Наумов // Вавиловские чтения – 2009 : матер. междунар. науч. – практ. конф.– Саратов: КУБиК, 2009.– С. 321–322.
70. **Павлов, П. И.** Исследование уровня шума в кабине трактора К-701/ П. И. Павлов, А. В. Наумов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова.– 2010.– № 1.– С. 49–52.
71. **Павлов, П. И.** Теоретическое обоснование звукопоглощающего устройства кабины трактора К-701 / П. И. Павлов, А. В. Наумов // Матер. Междунар. науч.– практ. конф., посвящ. 70-летию профессора В. Ф. Дубинина.– Саратов : КУБиК, 2010.– С. 167–170.
72. **Павлов, П. И.** Расчет параметров звукопоглощающей конструкции кабины трактора К-701 / П. И. Павлов, А. В. Наумов // Матер. Междунар. науч. – практ. конф., посвящ. 70-летию профессора В. Ф. Дубинина.– Саратов : КУБиК, 2010.– С. 148–150.
73. **Павлов, П. И.** Теоретическое определение звукового давления на поверхности капота при наличии звукопоглощающего материала / П. И. Павлов, А. В. Наумов // Вавиловские чтения – 2010 : матер. междунар. науч. – практ. конф.– Саратов: КУБиК, 2010.– Т. 3.– С. 332–333.

74. **Павлов, П. И.** Обоснование и расчет звукопоглощающего устройства кабины трактора К-701 «Кировец» / П. И. Павлов, А. В. Наумов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова.– 2011.– № 2.– С. 39–41.
75. **Поливаев, О. И.** Испытание сельскохозяйственной техники и энергосиловых установок: учебное пособие/О. И. Поливаев, О. М. Костиков; под общ. ред. О. И. Поливаева.–Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2015.–291с.
76. **Поливаев, О. И.** Электронные системы управления автотракторных двигателей: учебное пособие/О. И. Поливаев, О. М. Костиков, О. С. Ведринский.– Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2015.–200с.
77. **Поливаев, О. И.** Математическое моделирование процесса активного подавления пульсаций потока выхлопных газов мобильных энергетических средств [Текст]/О. И. Поливаев, В. С. Воищев, А. Н. Кузнецов//Вестник ВГАУ.– 2012.– 2(33).–С. 94-100.
78. **Поливаев, О. И.** Определение зоны эффективности активного подавления шума, распространяющегося по осесимметричным конструкциям [Текст]/О. И. Поливаев, А. Н. Кузнецов// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика.–Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГАУ.– 2014.–Т. 2, № 3-4 (8-4).– С. 451-455.
79. **Полянин, А. Д.** Справочник по линейным уравнениям математической физики/А. Д. Полянин.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.– 576 с.
80. **Разумовский, М. А.** Борьба с шумом на тракторах / М. А. Разумовский.– Минск: Наука и техника, 1973.– 208 с.
81. **Разумовский, М. А.** Прогнозирование шумовых характеристик поршневых двигателей / М. А. Разумовский.– Минск: Высшая школа, 1981.– 39 с.
82. Регулируемый глушитель шума (Entwicklung, Erprobung und Seireneinsatz eines neuartigen semiaktiven Schalldampfers) Ozlok T., Weltens H., Bielert F. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift.– 1999.– Vol. 101.– 1.– P. 40-46.
83. **Реунов, С. В.** Снижение вибронагруженности и структурного шума каркасных кабин тракторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Реунов.– Волгоград, 2001.–142с.

84. **Ржевкин, С. Н.** Курс лекций по теории звука/ С. Н. Ржевкин.– М.: Изд-во МГУ, 1960.– 338 с.
85. **Руссинковский, В. С.** Разработка метода расчета вибрации и структурного шума корпусных деталей автомобильных дизелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. С. Руссинковский.– М., 2005.–183с.
86. **Рэлей, Теория звука. Т. 2. /Релей.**– М.: ГИТТЛ, 1955.– 475 с.
87. **Сато, Ю.** Без паники! Цифровая обработка сигналов / Юкио Сато: пер. с яп. Селиной Т. Г.– М.: Додека-XXI, 2010.–176 с.
88. Сборный активно-пассивный глушитель (Integral active and passive silencer) Патент 2147209 США, Zaroski M., № 15615; Заявл. 29. 04. 94; опубл. 30. 10. 95.
89. **Седач, В. С.** Газовая динамика выпускных систем поршневых машин / В. С. Седач.– Харьков: Высшая школа, 1974.–171 с.
90. **Семенцов, С. Г.** Математические модели и методы анализа и синтеза средств активного управления акустическими полями: автореф. дис. д-ра ... техн. наук / С. Г. Семенцов.– М., 2009.– 24 с.
91. **Семенцов, С. Г.** Математические модели и методы анализа и синтеза средств активного управления акустическими полями: дис. д-ра ... техн. наук / С. Г. Семенцов.– М., 2009.– 270с.
92. **Сергиенко, А. Б.** Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MathLab/ А. Б. Сергиенко // Exponenta Pro.– 2003.– №1(1).– С. 18-28.
93. Система активного подавления шума впуска и выхлопа двигателя внутреннего сгорания. Патент 2240427 Россия, МПК F01 N01/08, Гарднер Д. В., Зайглер Э. В., № 4742315/06; заявл. 18. 10. 89; опубл. 15. 03. 94, Бюл. №34.
94. Система активного подавления шума выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания. Патент 2009334 Россия, МПК F01 N01/06, Васильев А. В., Мокринский А. В., № 2002107739/06; заявл. 26. 03. 2002; опубл. 20. 11. 2004.
95. **Скобцов, Е. А.** Методы снижения вибраций и шума дизелей / Е. А Скобцов, А. Д. Изотов, Л. В. Тузов.– М.: Машгиз, 1962.– 215 с.

96. **Скотников, В. А.** Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В. А. Скотников, А. А. Машенский, А. С. Солонский.– М.: Агропромиздат, 1986.– 383 с.
97. **Сперанский, В. С.** Сигнальные микропроцессоры и их применение в системах телекоммуникаций и электроники: учебное пособие для вузов/В. С. Сперанский.–М.: Горячая линия - Телеком, 2008.– 168 с.
98. **Старобинский, Р. Н.** Теория и синтез глушителей шума для систем впуска и выпуска газов двигателей внутреннего сгорания: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Р. Н. Старобинский.– М., 1983.– 24 с.
99. **Тейлор, Р.** Шум. / Р. Тейлор, под ред. М. А. Исаковича.– М.: Мир, 1978.– 308 с.
100. **Терентьев, А. Н.** Разработка методики акустической доводки легкового автомобиля по внешнему и внутреннему шуму: дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Терентьев.– Ижевск, 2005.– 220с.
101. **Терентьев, А. С.** Снижение шума колесных тракторов глушителями (на примере трактора К-701М) : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. С. Терентьев.– Л., 1991.– 19 с.
102. **Уидроу, Б.** Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу , С. Д Стирнз.– М.: Радио и связь, 1989.– 440 с.
103. **Устинов, Ю. Ф.** Виброакустические характеристики автогрейдера Volvo G946 / Ю. Ф. Устинов, Н. М. Волков, А. С. Покачалов, А. Н. Щиенко, Д. Н. Гольцов, Д. И. Чернышев // Научный вестник ВГАСУ.– 2013.– №3(1).- С. 226-230
104. **Устинов, Ю. Ф.** Оптимизация шумозащиты на рабочем месте операторов строительных и дорожных машин / Ю. Ф. Устинов, А. В. Скрынников, Н. Л. Хань // Научный вестник ВГАСУ.- 2013.– №3(1).– С. 243-249.
105. **Устинов, Ю. Ф.** Результаты виброакустических исследований автогрейдера класса 250 / Ю. Ф. Устинов, В. А. Жулай, Л. Х. Шарипов, Д. И. Чернышев, Д. Н. Гольцов // Механизация строительства.– 2014.– №2(836).– С. 32-37.

106. **Устинов, Ю. Ф.** Рекомендации по борьбе с автотранспортным шумом / Ю. Ф. Устинов//Воронежский научно-технический вестник.– Воронежский технический университет.– 2012.– №1(1).– С. 70-74
107. Уменьшение шума двигателя расположением выпускных клапанов (Engine noise reducing exhaust valve arrangement) / Bennet D.– Патент 4 068 630 США.– Изобрет. в СССР и за рубежом, 1978.- вып. 83.- с. 58.
108. **Фазулина, М. Э.** Основные пути повышения конкурентноспособности продукции тракторного машиностроения на современном этапе развития экономики / М. Э. Фазулина, Алёнина Е. Э. // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров».– М.: МГТУ «МАМИ», 2010.– С. 120-125.
109. **Фесина, М. И.** Разработка мероприятий по уменьшению шума двигателя на легковом автомобиле: дис. ... канд. техн. наук / М. И. Фесина.– М., 1984.– 338с.
110. **Фурман, И. В.** Охрана труда – проблема из проблем / И. В. Фурман // Сельский механизатор.– 2010.– №7.- С. 2-3.
111. **Хекл, М.** Справочник по технической акустике / под ред. М. Хекла и Х. А. Мюллера, Л.: Судостроение, 1980.– 440 с.
112. **Цукерников, И. Е.** Совершенствование нормирования и методов определения шумовых характеристик стационарных машин и оборудования: Методологические аспекты и практические решения: дис. ... д-ра. тех. наук / И. Е. Цукерников.– М., 1999.– 197 с.
113. **Чернов, М. В.** Снижение воздушного шума в кабине колесного тягача дорожных машин сотовыми звукопоглощающими конструкциями: дис. ... канд. техн. наук / М. В. Чернов.- Воронеж, 2000.–220с.
114. **Шапиро, Б. К.** Основы расчета глушителей выхлопа / В. К. Шапиро.– М.: Оборонгиз, 1943.– 64 с.
115. **Шапров, М. Н.** Способы повышения комфортности работы механизаторов за счет снижения шума в кабине трактора / М. Н. Шапров, И. С. Мартынов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее про-

фессиональное образование. Раздел Агропромышленная инженерия. Вып. 3(16) / ВГСХА.– Волгоград: ИПК «Нива», 2011.– С. 207-213.

116. **Шапров, М. Н.** Организация и обеспечение безопасности при посеве сельскохозяйственных культур//М. Н. Шапров, И. С. Мартынов, Д. А. Абезин, Поле деятельности. / Волгоград, 2012.– №6.– С. 55.

117. **Шарков, О. В.** Экспериментальное исследование шумовых характеристик импульсного вариатора / О. В. Шарков, А. В. Калинин // Безопасность жизнедеятельности.– 2007.– №4.– С. 28-30.

118. **Шкрабак, В. В.** Снижение и ликвидация производственного травматизма в основных отраслях АПК путем разработки и внедрения комплекса инженерных и организационно-технических трудовоохранных мероприятий: дис. ... д-ра техн. наук / В. В. Шкрабак.– СПб, 2006.– 550с.

119. Шум на транспорте. / Пер. с англ. К. Г. Бронштейна / Под ред. В. Е. Тольского, Г. В. Бутанова, Б. Н. Мельникова.– М.: Транспорт, 1995.– 368 с.

120. **Щельцыгин, Н. А.** Перспективы развития тракторостроения / Н. А. Щельцыгин // Материалы международного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009».– М.: МГТУ «МАМИ», 2009.– С. 415-424.

121. **Элькин, Ю. И.** Снижение шума строительно-дорожных машин: дис. ... докт. тех. наук / Ю. И. Элькин.– СПб., 2006.– 529 с.

122. **Юдин, Е. Я.** Борьба с шумом на производстве: справочник / Е. Я. Юдин, Л. А. Борисов, И. В. Горенштейн и др. ; под ред. Е. Я. Юдина.– М.: Машиностроение, 1985.– 399 с.

123. **Яковенко, А. Л.** Разработка методики и инструментальных средств для прогнозирования структурного шума двигателя внутреннего сгорания: дис. ... канд. техн. наук / А. Л. Яковенко.– М., 2009.–144с.

124. Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family. Application Report. Texas Instruments.– 1996.

125. **Elliott, S. J.** Active Noise Control / S. J. Elliott, P. A. Nelson // Noise / News International, 1994.- P.75-98.

126. **Guicking**, D. Active Control of Sound and Vibration History – Fundamentals – State of the Art / D. Guicking.– Gottingen: Festschrift DPI, 2007.– 32p.
127. **Haykin**, S. Adaptive Filter Theory, 4th edition/ S. Haykin .– Prentice Hall, 2002.– 936p.
128. **Kowal**, E. Dependence of productivity and number accident son the level of noise / E. Kowal.– 1998.– P. 561-566.
129. **Swinbanks**, M. A. The active control of sound propagating in long ducts / M. A. Swinbanks // Journal of Sound and Vibration, 1973.– №27.– P. 411-436.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А – ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ЧАСТЕЙ ГЛУШИТЕЛЯ

### Общие физические константы

$j := \sqrt{-1}$       Комплексное число  $j$

### Параметры аппроксимирующих фильтров

$N_{\text{фильтр}} := 2048$       Число коэффициентов в аппроксимирующих фильтрах, описывающих передаточные характеристики отдельных участков глушителя.

$f_{\text{дискр}} := 48000$       Частота дискретизации исходного звукового файла и всех производных файлов

$$f_{\text{среза}} := \frac{f_{\text{дискр}}}{2} = 2.4 \times 10^4$$

### Исходные геометрические характеристики проектируемого глушителя

$r_{\text{вых}} := 0.035$        $r_{\text{вых}}$  - внутренний радиус выходного патрубка, м;  
 $r_{\text{расп}} := 0.105$        $r_{\text{расп}}$  - радиус первого расширения со стороны выходного патрубка, м;  
 $r_{\text{корпуса}} := 0.075$        $r_{\text{корпуса}}$  - радиус корпуса, м;  
 $l_{\text{вых}} := 0.2$        $l_{\text{вых}}$  - длина выходного патрубка, м;  
 $l_{\text{расп1}} := 0.2$        $l_{\text{расп1}}$  - длина первой части расширительной камеры глушителя, м;  
 $l_{\text{расп2}} := 0.07$        $l_{\text{расп2}}$  - длина второй части расширительной камеры глушителя, м;  
 $l_{\text{расп3}} := 0.2$        $l_{\text{расп3}}$  - длина третьей части расширительной камеры глушителя, м;  
 $l_{\text{вх}} := 0.4$        $l_{\text{вх}}$  - длина входного патрубка глушителя, м;  
 $r_{\text{вх}} := 0.04$        $r_{\text{вх}}$  - радиус входного патрубка глушителя, м.

$$S(r) := \pi \cdot r^2$$

$$S2(r1, r2) := \pi(r1^2 - r2^2)$$

### Формирование матрицы входных значений

$N := 5$

```

X :=
  for i ∈ NN - 1
    NULLi ← 0
    Result⟨0⟩ ← NULL
    Result⟨1⟩ ← NULL
    Result⟨2⟩ ← NULL
    Result⟨3⟩ ← NULL
    Result⟨4⟩ ← NULL
    for i ∈ 0..N - 1
      for j ∈ 0..N - 1
        for k ∈ 0..N - 1
          for l ∈ 0..N - 1
            for m ∈ 0..N - 1
              (Result⟨0⟩)i·N4+j·N3+k·N2+l·N+m ← Γрасп + i · 0.005
              (Result⟨1⟩)i·N4+j·N3+k·N2+l·N+m ← Iвых + j · 0.05
              (Result⟨2⟩)i·N4+j·N3+k·N2+l·N+m ← Iрасп1 + k · 0.05
              (Result⟨3⟩)i·N4+j·N3+k·N2+l·N+m ← Iрасп2 + l · 0.01
              (Result⟨4⟩)i·N4+j·N3+k·N2+l·N+m ← Iрасп3 + m · 0.05
    Result
  
```

### Исходные параметры потока выхлопных газов

$$\rho := 1.3$$

$$T_{\text{газ}} := 300$$

$$c_{\text{звук}} := 20 \cdot \sqrt{T_{\text{газ}}} = 346.41$$

$\rho$  - плотность потока газов кг/м<sup>3</sup>;

$T_{\text{газ}}$  - температура потока газов, К;

$c$  - скорость звука в потоке, м/с

$$k(f) := 2\pi \cdot \frac{f}{c_{\text{звук}}} \quad \text{- волновое число:}$$

### Расчет передаточной характеристики концевика глушителя

$$Z_{\text{ВЫН\_ср}}(r_{\text{ВЫН}}) := S(r_{\text{ВЫН}}) \cdot \rho \cdot c_{\text{звук}}$$

$$\text{Struve}(z) := 4 \cdot \frac{z}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(z \cdot \cos(t)) \cdot (\sin(t))^2 dt$$

$$Z_{\text{КОИ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) := Z_{\text{ВЫН\_ср}}(r_{\text{ВЫН}}) \cdot \left( 1 - \frac{J_1(2 \cdot r_{\text{ВЫН}} \cdot k(f))}{r_{\text{ВЫН}} \cdot k(f)} - j \cdot \frac{\text{Struve}(2 \cdot r_{\text{ВЫН}} \cdot k(f))}{r_{\text{ВЫН}} \cdot k(f)} \right)$$

$$V_{\text{ОТР\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) := \frac{Z_{\text{КОИ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) - Z_{\text{ВЫН\_ср}}(r_{\text{ВЫН}})}{Z_{\text{КОИ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) + Z_{\text{ВЫН\_ср}}(r_{\text{ВЫН}})}$$

$$A_{\text{ПРОХ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) := \sqrt{1 - (|V_{\text{ОТР\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f)|)^2}$$

$$\Phi_{\text{ПРОХ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) := \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(V_{\text{ОТР\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f))}{\text{Re}(V_{\text{ОТР\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f))}\right)$$

$$K_{\text{ПРОХ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) := A_{\text{ПРОХ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) \cdot \cos(\Phi_{\text{ПРОХ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f)) + j \cdot (A_{\text{ПРОХ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) \cdot \sin(\Phi_{\text{ПРОХ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f)))$$

$$Z_{\text{ПЛОТ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, l_{\text{ВЫН}}, f) := Z_{\text{ВЫН\_ср}}(r_{\text{ВЫН}}) \cdot \frac{Z_{\text{КОИ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) \cdot \cosh(k(f) \cdot l_{\text{ВЫН}}) + j \cdot Z_{\text{ВЫН\_ср}}(r_{\text{ВЫН}}) \cdot \sinh(k(f) \cdot l_{\text{ВЫН}})}{Z_{\text{ВЫН\_ср}}(r_{\text{ВЫН}}) \cdot \cosh(k(f) \cdot l_{\text{ВЫН}}) + j \cdot Z_{\text{КОИ\_ВЫН}}(r_{\text{ВЫН}}, f) \cdot \sinh(k(f) \cdot l_{\text{ВЫН}})}$$

## Расчет передаточной характеристики 2-го участка расширения

$$Z_{\text{расп}}(r_{\text{расп}}) := S(r_{\text{расп}}) \cdot \rho \cdot c_{\text{звук}}$$

$$Z_{\text{расп4}}(r_{\text{расп}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) := \left( \frac{S(r_{\text{расп}})}{S(r_{\text{вых}})} \right)^2 \cdot Z_{\text{нач\_вых}}(r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f)$$

$$V_{\text{отр\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) := \frac{Z_{\text{расш4}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) - Z_{\text{расш}}(r_{\text{расш}})}{Z_{\text{расп4}}(r_{\text{расп}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) + Z_{\text{расп}}(r_{\text{расп}})}$$

$$A_{\text{прох\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) := \sqrt{1 - (|V_{\text{отр\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f)|)^2}$$

$$\Phi_{\text{прох\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) := \text{atan} \left( \frac{\text{Im}(V_{\text{отр\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f))}{\text{Re}(V_{\text{отр\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f))} \right)$$

$$K_{\text{прох\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) := A_{\text{прох\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) \cdot \cos(\Phi_{\text{прох\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f)) \dots \\ + j \cdot (A_{\text{прох\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) \cdot \sin(\Phi_{\text{прох\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f)))$$

$$Z_{\text{расш3}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) := Z_{\text{расш}}(r_{\text{расш}}) \cdot \frac{Z_{\text{расш4}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) \cdot \cosh(k(f) \cdot l_{\text{расш3}}) + j \cdot Z_{\text{расш}}(r_{\text{расш}}) \cdot \sinh(k(f) \cdot l_{\text{расш3}})}{Z_{\text{расп}}(r_{\text{расп}}) \cdot \cosh(k(f) \cdot l_{\text{расп3}}) + j \cdot Z_{\text{расп4}}(r_{\text{расп}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) \cdot \sinh(k(f) \cdot l_{\text{расп3}})}$$

## Расчет общей передаточной характеристики тыльной части глушителя в частотной области

$$K_{\text{прох\_тыл}}(r_{\text{корпуса}}, r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f) := K_{\text{прох\_вых}}(r_{\text{вых}}, f) \cdot K_{\text{прох\_расш2}}(r_{\text{расш}}, r_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, f)$$

## Расчет передаточной характеристики сужения потока в корпусе глушителя

$$Z_{\text{суж\_ср}}(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}}) := S2(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}}) \cdot \rho \cdot c_{\text{звук}}$$

$$Z_{\text{суж\_вых}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) := \left( \frac{S2(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}})}{S(\Gamma_{\text{расш}})} \right)^2 \cdot Z_{\text{расш3}}(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f)$$

$$V_{\text{отр\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) := \frac{Z_{\text{суж\_вых}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) - Z_{\text{суж\_ср}}(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}})}{Z_{\text{суж\_вых}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) + Z_{\text{суж\_ср}}(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}})}$$

$$A_{\text{прох\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) := \sqrt{1 - (|V_{\text{отр\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f)|)^2}$$

$$\Phi_{\text{прох\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) := \operatorname{atan} \left( \frac{\operatorname{Im}(V_{\text{отр\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f))}{\operatorname{Re}(V_{\text{отр\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f))} \right)$$

$$K_{\text{прох\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) := A_{\text{прох\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) \cdot \cos(\Phi_{\text{прох\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f)) \dots \\ + j \cdot (A_{\text{прох\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) \cdot \sin(\Phi_{\text{прох\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f)))$$

$$Z_{\text{суж\_вх}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) := Z_{\text{суж\_ср}}(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}}) \cdot \frac{Z_{\text{суж\_вых}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) \cdot \cosh(k(f) \cdot l_{\text{расш2}}) + Z_{\text{суж\_ср}}(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}}) \cdot \sinh(k(f) \cdot l_{\text{расш2}})}{Z_{\text{суж\_ср}}(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}}) \cdot \cosh(k(f) \cdot l_{\text{расш2}}) + j \cdot Z_{\text{суж\_вых}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, f) \cdot \sinh(k(f) \cdot l_{\text{расш2}})}$$

## Расчет передаточной характеристики 1-го участка расширения

$$Z_{\text{расш2}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) := \left( \frac{S(\Gamma_{\text{расш}})}{S2(\Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{корпуса}})} \right)^2 \cdot Z_{\text{суж\_вх}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f)$$

$$V_{\text{отр\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) := \frac{Z_{\text{расш2}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) - Z_{\text{расш}}(\Gamma_{\text{расш}})}{Z_{\text{расш2}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) + Z_{\text{расш}}(\Gamma_{\text{расш}})}$$

$$A_{\text{прох\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) := \sqrt{1 - (|V_{\text{отр\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f)|)^2}$$

$$\Phi_{\text{прох\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) := \text{atan} \left( \frac{\text{Im}(V_{\text{отр\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f))}{\text{Re}(V_{\text{отр\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f))} \right)$$

$$K_{\text{прох\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) := A_{\text{прох\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) \cdot \cos(\Phi_{\text{прох\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f)) \dots \\ + j \cdot (A_{\text{прох\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) \cdot \sin(\Phi_{\text{прох\_расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f)))$$

$$Z_{\text{расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, l_{\text{расш1}}, f) := Z_{\text{расш}}(\Gamma_{\text{расш}}) \cdot \frac{Z_{\text{расш2}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) \cdot \cosh(k(f) \cdot l_{\text{расш1}}) + j \cdot Z_{\text{расш}}(\Gamma_{\text{расш}}) \cdot \sinh(k(f) \cdot l_{\text{расш1}})}{Z_{\text{расш}}(\Gamma_{\text{расш}}) \cdot \cosh(k(f) \cdot l_{\text{расш1}}) + j \cdot Z_{\text{расш2}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, f) \cdot \sinh(k(f) \cdot l_{\text{расш1}})}$$

## Расчет передаточной характеристики входного участка глушителя

$$Z_{\text{вх\_ср}}(\Gamma_{\text{вх}}) := S(\Gamma_{\text{вх}}) \cdot \rho \cdot c_{\text{звук}}$$

$$Z_{\text{вх\_вых}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, l_{\text{расш1}}, f) := \left( \frac{S(\Gamma_{\text{вх}})}{S(\Gamma_{\text{расш}})} \right)^2 \cdot Z_{\text{расш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, l_{\text{расш1}}, f)$$

$$V_{\text{отр\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, l_{\text{расш1}}, f) := \frac{Z_{\text{вх\_вых}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, l_{\text{расш1}}, f) - Z_{\text{вх\_ср}}(\Gamma_{\text{вх}})}{Z_{\text{вх\_вых}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, l_{\text{расш1}}, f) + Z_{\text{вх\_ср}}(\Gamma_{\text{вх}})}$$

$$A_{\text{прох\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, l_{\text{расш1}}, f) := \sqrt{1 - (|V_{\text{отр\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{расш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{расш3}}, l_{\text{расш2}}, l_{\text{расш1}}, f)|)^2}$$

$$\Phi_{\text{прок\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f) := \text{atan} \left( \frac{\text{Im}(\text{V}_{\text{отр\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f))}{\text{Re}(\text{V}_{\text{отр\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f))} \right)$$

$$\begin{aligned} K_{\text{прок\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f) := & A_{\text{прок\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f) \cdot \cos(\Phi_{\text{прок\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f)) \dots \\ & + j \cdot (A_{\text{прок\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f) \cdot \sin(\Phi_{\text{прок\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f))) \end{aligned}$$

### Расчет общей передаточной характеристики фронтальной части глушителя в частотной области

$$K_{\text{прок\_фронт}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, l_{\text{раеш1}}, f) := K_{\text{прок\_суж}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, f) \cdot K_{\text{прок\_раеш1}}(\Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}}, l_{\text{вых}}, l_{\text{раеш3}}, l_{\text{раеш2}}, f) \cdot K_{\text{прок\_вх}}(\Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, \Gamma_{\text{раеш}}, \Gamma_{\text{вых}},$$

### Дискретизация передаточных характеристик фронтальной и тыльной частей глушителя

$$I := 0$$

$$\text{INDEX} := \text{FRAME} + I \cdot 100$$

$$i := 0..N_{\text{фильтр}}$$

$$\text{DISCR}_{\text{фронт}_i} := K_{\text{прок\_фронт}} \left[ \Gamma_{\text{вх}}, \Gamma_{\text{корпуса}}, (X^{(0)})_{\text{INDEX}}, \Gamma_{\text{вых}}, (X^{(1)})_{\text{INDEX}}, (X^{(4)})_{\text{INDEX}}, (X^{(3)})_{\text{INDEX}}, (X^{(2)})_{\text{INDEX}}, \frac{f_{\text{среза}}}{N_{\text{фильтр}} - I} \cdot i \right]$$

$$\text{DISCR}_{\text{тыл}_i} := K_{\text{прок\_тыл}} \left[ \Gamma_{\text{корпуса}}, (X^{(0)})_{\text{INDEX}}, \Gamma_{\text{вых}}, (X^{(1)})_{\text{INDEX}}, \frac{f_{\text{среза}}}{N_{\text{фильтр}} - I} \cdot i \right]$$

$$\text{DISCR}_{\text{фронт}_0} := 0$$

$$\text{DISCR}_{\text{тыл}_0} := 0$$

### Расчет импульсных характеристик тыльной и фронтальной частей глушителя

$$\text{IMP}_{\text{фронт}} := \text{IFFT}(\text{DISCR}_{\text{фронт}})$$

$$\text{IMP}_{\text{тыл}} := \text{IFFT}(\text{DISCR}_{\text{тыл}})$$

## Формирование имен выходных файлов и запись в них импульсных характеристик

FILEFRONT := "G:\FOR DISSERTATION\FRONT\"

FILEBACK := "G:\FOR DISSERTATION\BACK\"

NAME := num2str(INDEX)

ADRFront := concat(FILEFRONT, NAME, ".dat")

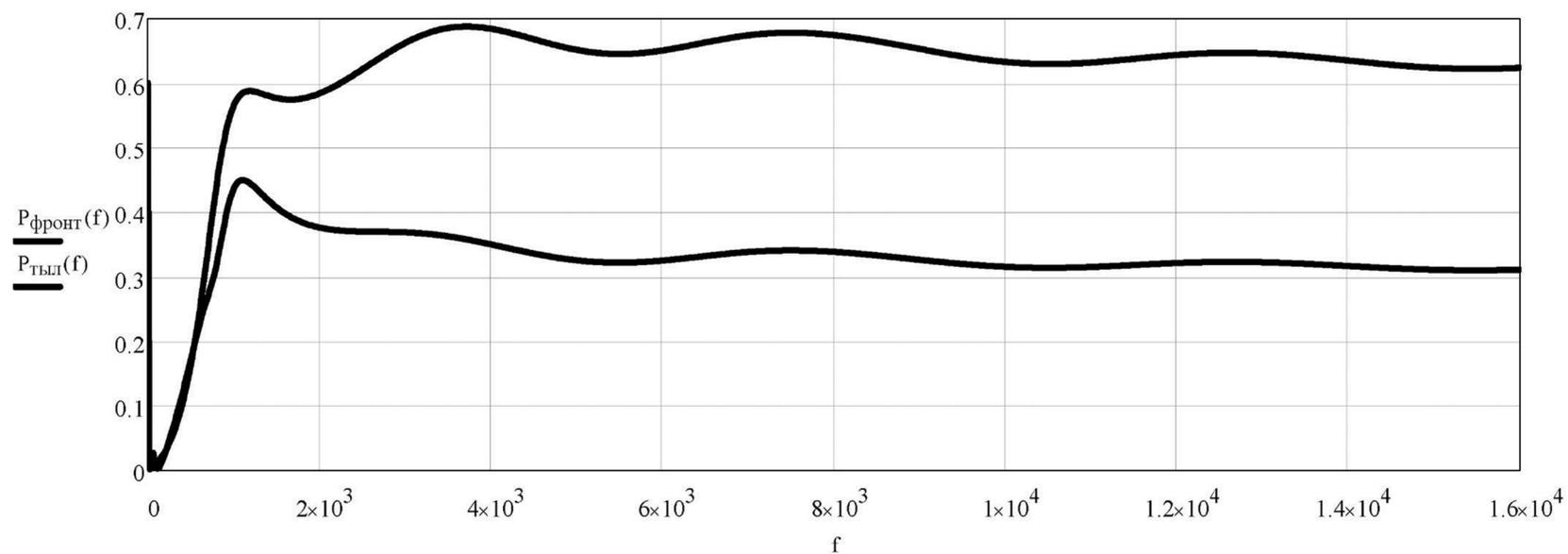
ADRBACK := concat(FILEBACK, NAME, ".dat")

WRITEPRN(ADRFront) := IMP<sub>фронт</sub>

WRITEPRN(ADRBACK) := IMP<sub>тыл</sub>

$P_{\text{фронт}}(f) := |K_{\text{прох\_фронт}}(0.04, 0.075, 0.105, 0.035, 0.2, 0.2, 0.09, 0.25, f)|$

$P_{\text{тыл}}(f) := |K_{\text{прох\_тыл}}(0.075, 0.105, 0.035, 0.2, f)|$



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б – РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ГЛУШИТЕЛЕ

### Расчет аэродинамических потерь в глушителе шума выпуска

$$\nu_{\text{газ}} := 76.3 \cdot 10^{-6} \quad \text{- вязкость выхлопных газов, Ст;}$$

$$\rho_{\text{воз}} := 1.295 \quad \text{- плотность воздуха, кг/м}^3\text{;}$$

$$p_0 := 0.1 \cdot 10^6 \quad \text{- нормальное давление окружающей среды, Па;}$$

$$p_{\text{газ}} := 0.115 \cdot 10^6 \quad \text{- давление выхлопных газов, Па;}$$

$$T_{\text{газ}} := 800 \quad \text{- температура выхлопных газов, К;}$$

$$T_0 := 273 \quad \text{- температура окружающей среды, К;}$$

$$\delta := \frac{\pi}{2}$$

$$\text{plot} := \text{plot}_0 \cdot \frac{p_0}{p_{\text{газ}}} \cdot \frac{T_0}{T_{\text{газ}}} = 0.442$$

$$D(\gamma_{\text{расш}}, \gamma_{\text{корп}}) := \frac{\gamma_{\text{корп}}}{\gamma_{\text{расш}}}$$

$$v(Q, \gamma_{\text{расш}}, \gamma_{\text{корп}}) := \frac{Q}{\pi \cdot (\gamma_{\text{расш}}^2 - \gamma_{\text{корп}}^2)}$$

$$\text{Re}(Q, \gamma_{\text{расш}}, \gamma_{\text{корп}}) := \frac{(2 \cdot \gamma_{\text{расш}}) \cdot v(Q, \gamma_{\text{расш}}, \gamma_{\text{корп}})}{\nu_{\text{газ}}}$$

$$\Delta(\gamma_{\text{расш}}, \gamma_{\text{корп}}) := 120 \cdot \frac{1 + 0.5 \cdot D(\gamma_{\text{расш}}, \gamma_{\text{корп}}) \cdot (1 + \sin(\delta))}{(1 - D(\gamma_{\text{расш}}, \gamma_{\text{корп}})^2 \cdot \sin(\delta))^2}$$

$$\text{Eps}_{\text{расш1}}(\gamma_{\text{вх}}, \gamma_{\text{расш}}) := \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_{\text{вх}}}{\gamma_{\text{расш}}} \right)^2 \right]^2$$

$$Eps_{кв}(r_{расш}, r_{корп}) := \left( \frac{1.56}{1 - D(r_{расш}, r_{корп}) \cdot \sin(\delta)} - 1 \right)^2$$

$$Eps_{затв}(Q, r_{расш}, r_{корп}) := \frac{\Lambda(r_{расш}, r_{корп})}{Re(Q, r_{расш}, r_{корп})} \cdot \left( 1 - \frac{50}{Re(Q, r_{расш}, r_{корп})} \right) \cdot Eps_{кв}(r_{расш}, r_{корп})$$

$$Eps_{расш2}(r_{расш}, r_{корп}) := \left( 1 - \frac{r_{расш}^2 - r_{корп}^2}{r_{расш}^2} \right)^2$$

$$Eps_{суж}(r_{расш}, r_{вых}) := \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{r_{вых}^2}{r_{расш}^2} \right)$$

$$p(Q, r_{вх}, r_{расш}, r_{корп}, r_{вых}) := \frac{plot}{2} \cdot \left[ v(Q, r_{вх}, 0)^2 \cdot Eps_{расш1}(r_{вх}, r_{расш}) + v(Q, r_{расш}, 0)^2 \cdot Eps_{затв}(Q, r_{расш}, r_{корп}) \dots \right. \\ \left. + \left( v(Q, r_{расш}, r_{корп})^2 \cdot Eps_{расш2}(r_{расш}, r_{корп}) + v(Q, r_{расш}, 0)^2 \cdot Eps_{суж}(r_{расш}, r_{вых}) \right) \right]$$

$$p1(Q, r_{вх}, r_{расш}, r_{корп}, r_{вых}) := 136.5 \cdot \frac{plot_0 \cdot \rho_{газ} \cdot Q^2}{\rho_0 \cdot T \cdot \pi^2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{r_{вх}^2} - \frac{1}{r_{расш}^2} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{r_{расш}^2 - r_{вых}^2}{r_{расш}^4} \right) \dots \right. \\ \left. + \left[ \frac{1}{Q \cdot r_{расш}^2 \cdot (r_{расш} - r_{корп})} \cdot \left[ 60 \cdot \pi \cdot \nu_{газ} \cdot r_{расш}^2 + \left[ Q \cdot r_{расш} - 25 \pi \cdot \nu_{газ} \cdot (r_{расш}^2 - r_{корп}^2) \right] \cdot \left( 0.56 + \frac{r_{корп}}{r_{расш}} \right) \right] \right] \dots \right. \\ \left. + \left( \frac{1}{r_{расш}^2 - r_{корп}^2} - \frac{1}{r_{расш}^2} \right)^2 \right]$$

$$r_{\text{ВЫХ}} := 0.04$$

$$r_{\text{КОРП}} := 0.075$$

$$r_{\text{ВХ}} := 0.04$$

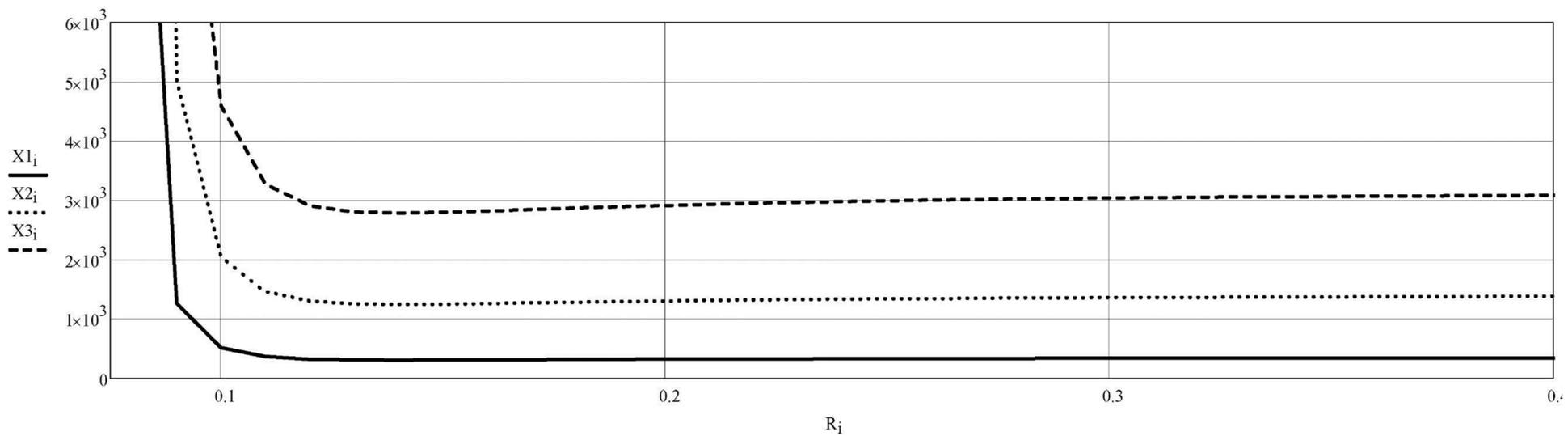
$$i := 1..400$$

$$X1_i := p\left(0.2, r_{\text{ВХ}}, \frac{i}{100}, r_{\text{КОРП}}, r_{\text{ВЫХ}}\right)$$

$$X2_i := p\left(0.4, r_{\text{ВХ}}, \frac{i}{100}, r_{\text{КОРП}}, r_{\text{ВЫХ}}\right)$$

$$X3_i := p\left(0.6, r_{\text{ВХ}}, \frac{i}{100}, r_{\text{КОРП}}, r_{\text{ВЫХ}}\right)$$

$$R_i := \frac{i}{100}$$



## ПРИЛОЖЕНИЕ В – ПРОГРАММА РАСЧЕТА ДПФ, АВТОКОРРЕЛЯЦИИ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФОРМАТОВ ФАЙЛОВ СИГНАЛОВ

```

/*ПОДКЛЮЧЕНИЕ БИБЛИОТЕК*/
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <direct.h>

/*МАКРООПРЕДЕЛЕНИЯ*/
#define MAX_HZ 10 //Число октавных полос
#define MAX_DB 7 //Число УЗД
#define MAX_CH 5 //Число каналов

#define BUFFER 2048 //Создание буфера
#define START 44100*65 //Точка начала обработки
#define PI 3.141592654

/*ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ*/
void CREATE_FOLDER(void); //функция создания нужных папок
int WAVE_TO_BIN(FILE *SOURCE, FILE *DESTINATION); //преобразование .wav в .bin
int AVTOCOR(FILE *SOURCE, FILE *AVTOCORRELATION); //вычислении автокорреляции
int DFT(FILE *SOURCE, FILE *SPECTR); //определение ДПФ

typedef struct {
    double real;
    double imag;
    double modulus;
    double angle;
} COMPLEX;

int i,j, k, l;//счетчики

char adress[255];

/*Объявление среднеоктаных частот - части имени файлов*/
short HZ[]={32, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000};

/*Объявление УЗД - части имени файлов*/
short DB[]={60, 70, 80, 90, 100, 110, 120};

/*Объявление имен файлов*/
char NAME[5][255] =
{
    "Input",
    "Output",
    "Kabine",
    "Structure",
    "Narugnii"
};

/*ОСНОВНАЯ ПРОГРАММА*/
void main(void)
{
    FILE *source; //файл источник
    FILE *destination; //файл приемник
    float tmp;
    int temp, temp1;

```

```

temp1 = 0;

CREATE_FOLDER();           //создание папок

for(i=0; i<MAX_HZ;i++)
{
    for(j=0; j<MAX_DB;j++)
    {
        for(k=1; k<MAX_CH;k++)
        {
            sprintf(address, "E:\\Microphones\\Calibration\\%d
Hz\\Ch\\_%d\\_%d.wav",HZ[i],k,DB[j]);
            sprintf(address, "F:\\RASSHET\\III\\%s\\.wav",NAME[1]);
            if (fopen_s(&source, address, "rb"))
            {
                continue;
            }
            sprintf(address, "F:\\RASSHET\\III\\Kabine.bin");
            fopen_s(&destination, address, "wb");

            WAVE_TO_BIN(source, destination);

            fclose(destination);
            fclose(source);

            sprintf(address, "F:\\RASSHET\\III\\Kabine.bin");
            if (fopen_s(&source, address, "rb"))
                printf("Cannot open file %s for reading!", address);

            sprintf(address, "F:\\RASSHET\\III\\Kabine-avtocorrelation.txt");
            fopen_s(&destination, address, "w");

            AVTOCOR(source, destination);
            fclose(destination);

            sprintf(address, "F:\\RASSHET\\III\\Kabine-spectrum.txt");
            fopen_s(&destination, address, "w");

            rewind(source);

            DFT(source, destination);
            fclose(destination);

            fclose(source);

            tmp= 100.0*((i+j+k)/(MAX_DB+MAX_HZ+MAX_CH-3));
            temp = (int)tmp;
            if(temp>temp1)
            {
                temp1 = temp - temp1;
                for(l=0; l<temp1; l++)
                    printf("*");
                temp1 = temp;
            }
        }
    }
}
_getch();
}

/*ФУНКЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ WAV-файла В BIN-файл*/

```

```

int WAVE_TO_BIN(FILE *SOURCE, FILE *DESTINATION)
{
    int i,j;
    char temp;
    int SIZE;
    float Res;
    int ResINT;

    for(i=0; i<42;i++)
        temp = fgetc(SOURCE);
    fread(&SIZE, sizeof(int),1,SOURCE);

    SIZE /= 4;

    for(i=0; i<SIZE; i++)
    {
        fread(&Res, sizeof(float),1,SOURCE);
        Res *= 8388607;
        ResINT = (int)Res;
        fwrite(&ResINT, 3,1,DESTINATION);;
    }
}

/*ФУНКЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АВТОКОРРЕЛЯЦИИ*/
int AVTOCOR(FILE *SOURCE, FILE *AVTOCORRELATION)
{
    int start = START;
    int i,j;
    int temp;
    int buf[BUFFER*4];
    double Res, Resfirst;
    float Resf;

    rewind(SOURCE);

    for(i=0; i<START;i++)
        fread(&temp, 3 , 1 ,SOURCE);

    for(i=0; i<BUFFER*4;i++)
    {
        fread(&temp, 3 , 1 ,SOURCE);
        buf[i] = temp<<8;
        buf[i] >>= 8;
    }

    for(i=0;i<BUFFER*2;i++)
    {
        Res = 0;
        for(j=0;j<BUFFER*2;j++)
        {
            if (i+j==BUFFER)
                break;
            Res += 1.0*buf[j]*buf[i+j];
        }
        if(i==0)
            Resfirst = Res;
        Resf = (float)(Res/Resfirst);
        fprintf(AVTOCORRELATION, "%d\t%f\n", i, Resf);
    }
    return 0;
}

```

}

/\*ФУНКЦИЯ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ\*/

int DFT(FILE \*SOURCE, FILE \*SPECTR)

{

```

    long k;
    long n;
    int temp;
    double WN;
    double wk;
    double c;
    double s;
    double XR[BUFFER];
    double XI[BUFFER];

```

```

    COMPLEX x[BUFFER];

```

```

    rewind(SOURCE);

```

```

    for(k=0; k<START;k++)
        fread(&temp, 3 , 1 ,SOURCE);

```

```

    for(k=0; k<BUFFER;k++)
    {
        fread(&temp, 3 , 1 ,SOURCE);
        temp <<= 8;
        temp >>= 8;
        x[k].real = (double)1.0*temp;
        x[k].imag = 0;
    }

```

```

    WN = 2*PI/BUFFER;

```

```

    for(k=0;k<BUFFER;++k)
    {
        XR[k]=0.0;
        XI[k]=0.0;
        wk = k*WN;
        for(n=0;n<BUFFER;++n)
        {
            c = cos((double)n*wk);
            s = sin((double)n*wk);
            XR[k]=XR[k]+x[n].real*c+x[n].imag*s;
            XI[k]=XI[k]-x[n].real*s+x[n].imag*c;
            if(n==(BUFFER-10))
                temp =0;
        }
    }

```

```

    for(k=0;k<BUFFER;++k)
    {
        x[k].real=XR[k];
        x[k].imag=XI[k];
        x[k].modulus =sqrt(x[k].real*x[k].real+x[k].imag*x[k].imag);
        x[k].angle = atan(x[k].imag/x[k].real);
    }

```

```

    for(k=0;k<BUFFER/2;k++)
    {
        fprintf(SPECTR, "%d\t%f\n", k, x[k].modulus);
    }

```

}

```

void CREATE_FOLDER(void)
{
    if (_mkdir("E:\\DISSERTATION") == 0)
    {
        printf("Folder E:\\DISSERTATION created\n",adress);
    }
    else
    {
        perror("Error");
    }

    for(i=0;i<MAX_DB;i++)
    {
        sprintf(address, "E:\\DISSERTATION\\%d dB",DB[i]);
        if (_mkdir(address) == 0)
        {
            printf("Folder %s created\n",adress);
        }
        else
        {
            perror("Error");
        }
        sprintf(address, "E:\\DISSERTATION\\%d dB\\AVTOCOR",DB[i]);
        if (_mkdir(address) == 0)
        {
            printf("Folder %s created\n",adress);
            for(j=1;j<MAX_CH;j++)
            {
                sprintf(address, "E:\\DISSERTATION\\%d dB\\AVTOCOR\\CHANNEL\\%d",DB[i],j);
                if (_mkdir(address) == 0)
                {
                    printf("Folder %s created\n",adress);
                }
                else
                {
                    perror("Error");
                }
            }
        }
        else
        {
            perror("Error");
        }
        sprintf(address, "E:\\DISSERTATION\\%d dB\\SPEKTR",DB[i]);
        if (_mkdir(address) == 0)
        {
            printf("Folder %s created\n",adress);
            for(j=1;j<MAX_CH;j++)
            {
                sprintf(address, "E:\\DISSERTATION\\%d dB\\SPEKTR\\CHANNEL\\%d",DB[i],j);
                if (_mkdir(address) == 0)
                {
                    printf("Folder %s created\n",adress);
                }
                else
                {
                    perror("Error");
                }
            }
        }
        else
    }
}

```

```
{
    perror("Error");
}
sprintf(address, "E:\\DISSERTATION\\%d dB\\BIN",DB[i]);
    if (_mkdir(address) == 0)
    {
        printf("Folder %s created\n",address);
    }
    else
    {
        perror("Error");
    }
}
}
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г – ПРОГРАММА РАСЧЕТА ДИСКРЕТНОГО СПЕКТРА СИГНАЛА

```

#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
#include <time.h>
#include <direct.h>

#define BUFFER 32768
#define PI 3.141592654

int DFT(FILE *SOURCE, FILE *SPECTR);

time_t t;
struct tm* ATM;

typedef struct {
    double real;
    double imag;
    double modulus;
    double angle;
} COMPLEX;

int main(void)
{
    FILE *SOURCE;
    FILE *DESTINATION;
    char TEMP_STR[255];
    char NAME_INPUT_FILE[]="C:\\OST\\";
    char NAME_OUTPUT_FILE[]="C:\\TEXT\\";

    char END_INPUT_FILE[]=".bin";
    char END_OUTPUT_FILE[]="_OSTSPR.dat";

    char COUNT_STR[5];

    short count=0;
    short temp;
    short *temp2=&temp;

    int i,j, cykle;

    t=time(NULL);

    for(cykle=653;cykle<654;cykle++)
    {

        count = cykle;
        /***Формирование имен файлов назначения***/
        itoa(count,COUNT_STR,10);          //перевод целого числа в литерал

        strcpy(TEMP_STR, NAME_INPUT_FILE);
        strcat(TEMP_STR, COUNT_STR);
        strcat(TEMP_STR,END_INPUT_FILE); //формирование адреса входного файла
        time(&t);
    }
}

```

```

ATM = localtime(&t);
printf("%s\t%d:%d:%d\n",TEMP_STR,ATM->tm_hour, ATM->tm_min, ATM->tm_sec);

/*****Открытие файла для чтения*****/
if (fopen_s(&SOURCE,TEMP_STR, "rb"))
{
    printf("Cannot open source file...\n");
    _getch();
    return 0;
}

strcpy(TEMP_STR, NAME_OUTPUT_FILE);
strcat(TEMP_STR, COUNT_STR); //формирование имени выходного файла
strcat(TEMP_STR, END_OUTPUT_FILE);

if (fopen_s(&DESTINATION,TEMP_STR, "w"))
{
    printf("Cannot open destination file...\n");
    _getch();
    return 0;
}

rewind(SOURCE);

DFT(SOURCE, DESTINATION);

fclose(DESTINATION);
fclose(SOURCE);
}
_getch();
return 0;
}

int DFT(FILE *SOURCE, FILE *SPECTR)
{
    long k;
    long n;
    short temp;
    double WN;
    double wk;
    double c;
    double s;
    double *XR;
    double *XI;

    COMPLEX *x;

    x = (COMPLEX*)malloc(BUFFER*sizeof(COMPLEX));
    XR = (double*)malloc(BUFFER*sizeof(double));
    XI = (double*)malloc(BUFFER*sizeof(double));

    rewind(SOURCE);
    for(k=0; k<BUFFER;k++)
    {
        fread(&temp, 2 , 1 ,SOURCE);
        x[k].real = (double)1.0*temp;
        x[k].imag = 0;
    }
}

```

```

WN = 2*PI/BUFFER;

for(k=0;k<BUFFER;++k)
{
    XR[k]=0.0;
    XI[k]=0.0;
    wk = k*WN;
    for(n=0;n<BUFFER;++n)
    {
        c = cos((double)n*wk);
        s = sin((double)n*wk);
        XR[k]=XR[k]+x[n].real*c+x[n].imag*s;
        XI[k]=XI[k]-x[n].real*s+x[n].imag*c;
        if(n==(BUFFER-10))
            temp =0;
    }
}
for(k=0;k<BUFFER;++k)
{
    x[k].real=XR[k];
    x[k].imag=XI[k];
    x[k].modulus =sqrt(x[k].real*x[k].real+x[k].imag*x[k].imag);
    x[k].angle = atan(x[k].imag/x[k].real);
}
for(k=0;k<BUFFER/2;k++)
{
    fprintf(SPECTR, "%d\t%f\n", k, x[k].modulus/BUFFER);
}
free(x);
free(XR);
free(XI);
}

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д – ПРОГРАММА РАСЧЕТА ВЗАИМОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДВУХ СИГНАЛОВ

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>

#define BUFFER 4096
#define START 44100*65

int VCOR(int *X_1, int *X_2, double *Y);

int READ_DATA( FILE *SOURCE, int *X);

void main(void)
{
    FILE *source_1, *source_2;
    FILE *destination;

    int x_1[BUFFER*2];
    int x_2[BUFFER*2];
    double y[BUFFER];
    char address[255];
    int i;
    double timestep = 1.0/44100;

    sprintf(address, "F:\\\\RASSHET\\\\I\\\\Structure.bin");//адрес 1-го исследуемого файла

    if (fopen_s(&source_1, address, "rb"))
        printf("Cannot open file %s for reading!", address);

    sprintf(address, "F:\\\\RASSHET\\\\I\\\\Kabine.bin");//адрес 2-го исследуемого файла

    if (fopen_s(&source_2, address, "rb"))
        printf("Cannot open file %s for reading!", address);

    sprintf(address, "F:\\\\RASSHET\\\\I\\\\VCORE_Structure.txt");//адрес файла-приёмника

    if (fopen_s(&destination, address, "w"))
        printf("Cannot open file %s for writing!", address);

    READ_DATA(source_1, x_1);
    READ_DATA(source_2, x_2);

    VCOR( x_1, x_2, y);

    for (i=0;i<BUFFER;i++)
        fprintf(destination,"%f\\t%f\\n", i*timestep, y[i]/1000000000000);

    fclose(source_1);
    fclose(source_2);
    fclose(destination);
}

int VCOR(int *X_1, int *X_2, double *Y)
{
    int i,j;
    double Res;

    for(i=0;i<BUFFER;i++)

```

```
{
    Res = 0;
    for(j=0;j<BUFFER;j++)
    {
        Res += 1.0*( *(X_1+j))*( *(X_2+i+j));
    }
    *Y = Res;
    Y++;
}

return 0;
}

int READ_DATA( FILE *SOURCE, int *X)
{
    int i;
    int temp;

    rewind(SOURCE);

    for(i=0; i<START;i++)
        fread(&temp, 3 , 1 ,SOURCE);

    for(i=0; i<BUFFER*2;i++)
    {
        fread(&temp, 3 , 1 ,SOURCE);
        *X = temp<<8;
        *X >>= 8;
        X++;
    }
    return 0;
}
```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е – ПЕРЕДАТОНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ  
ДИНАМИЧЕСКИХ МИКРОФОНОВ**

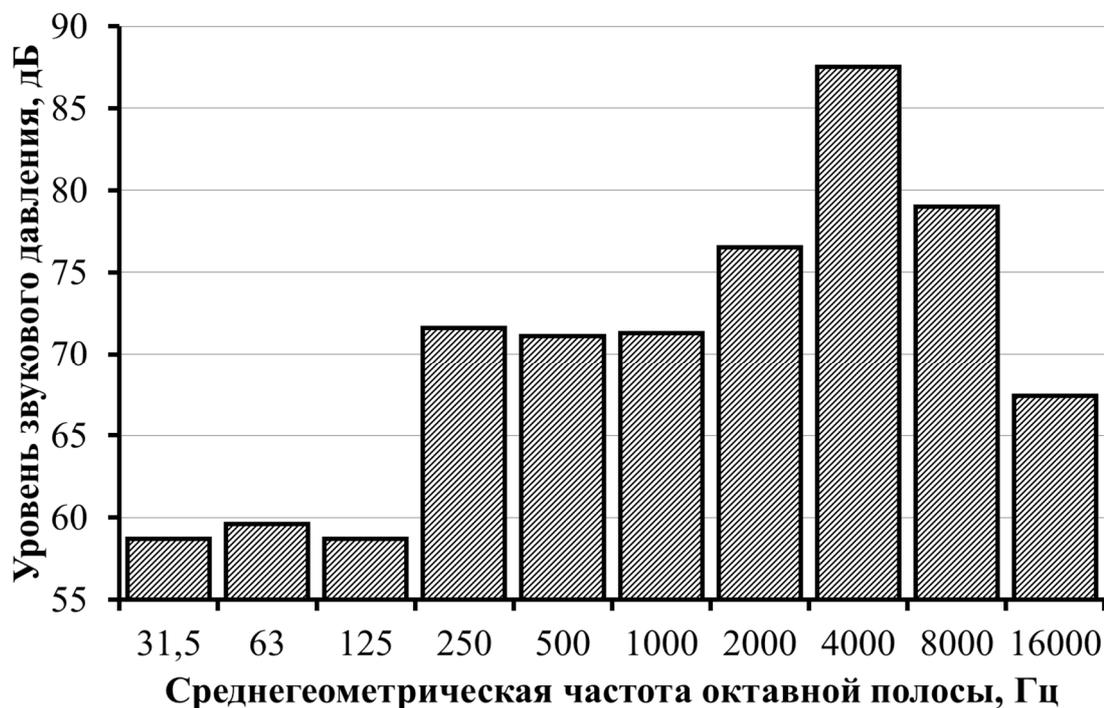


Рисунок 76 – Поправки, рассчитанные для первого канала записи

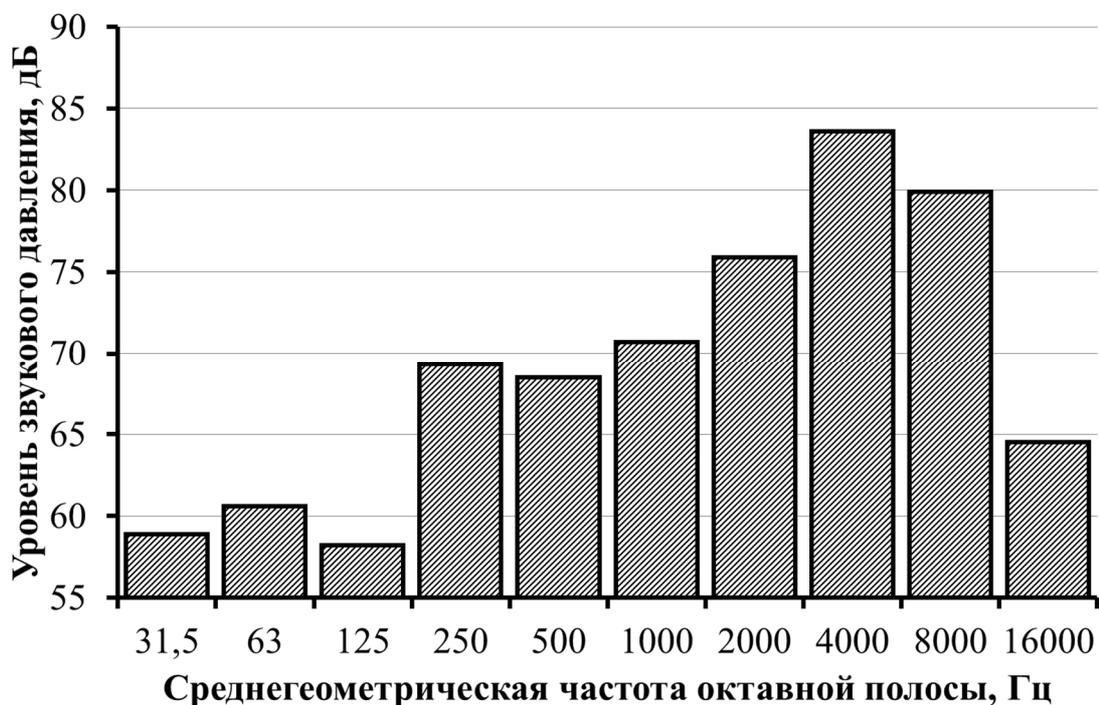


Рисунок 77 – Поправки, рассчитанные для второго канала записи

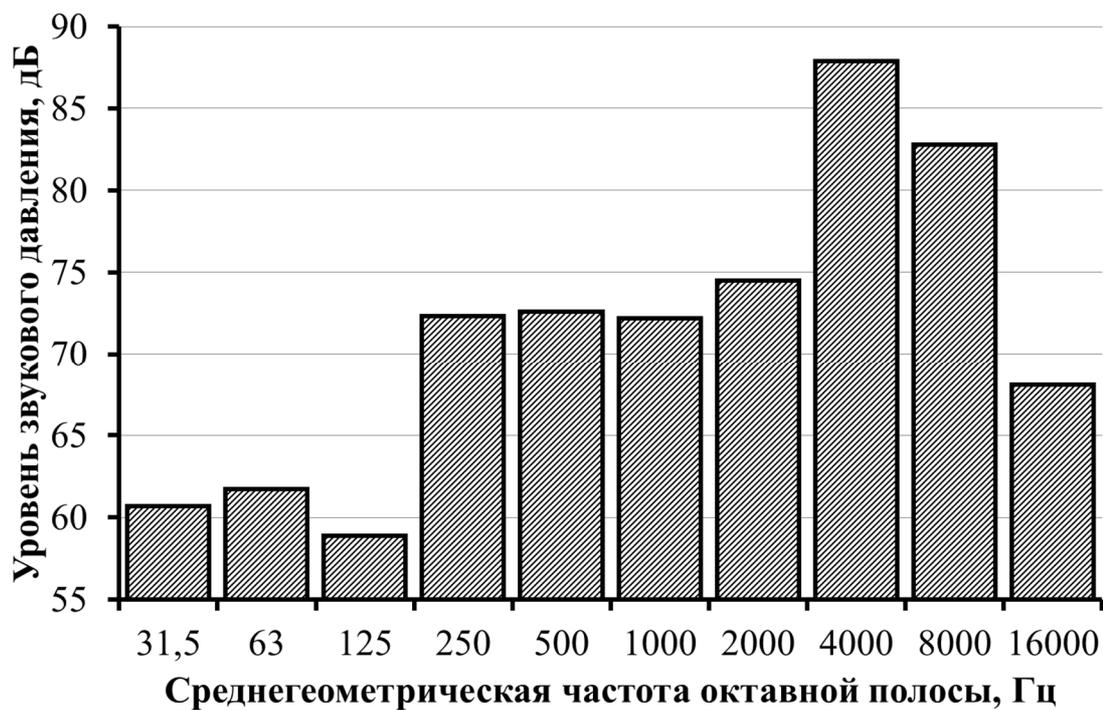


Рисунок 78 – Поправки, рассчитанные для третьего канала записи

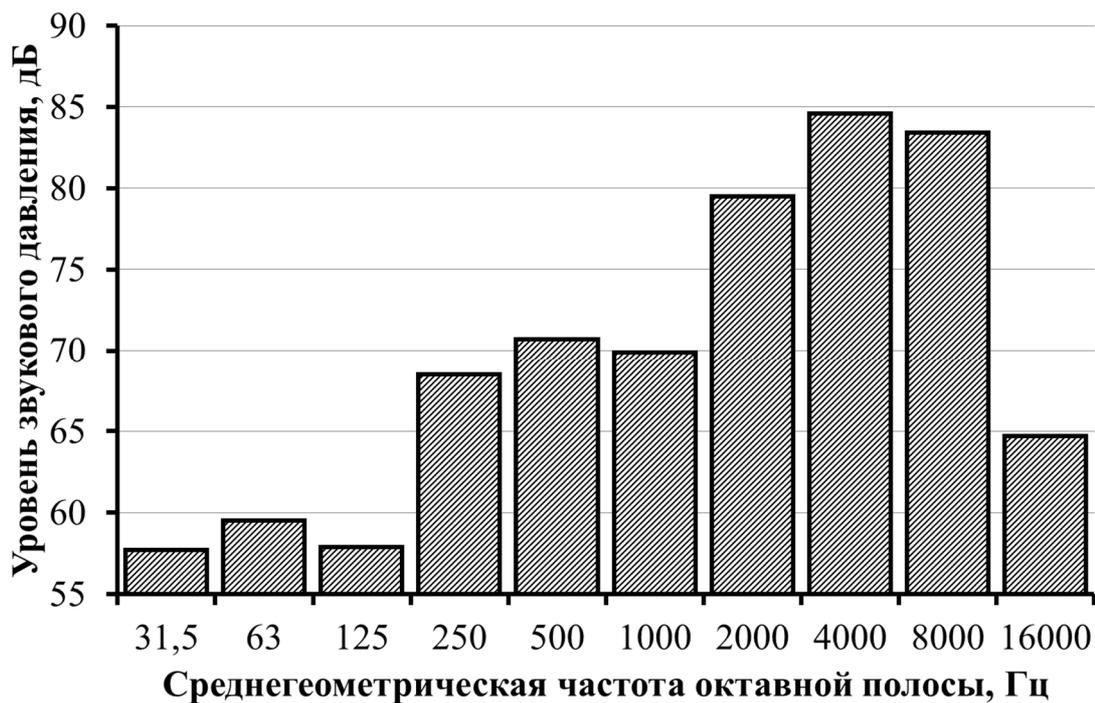


Рисунок 79 – Поправки, рассчитанные для четвертого канала записи

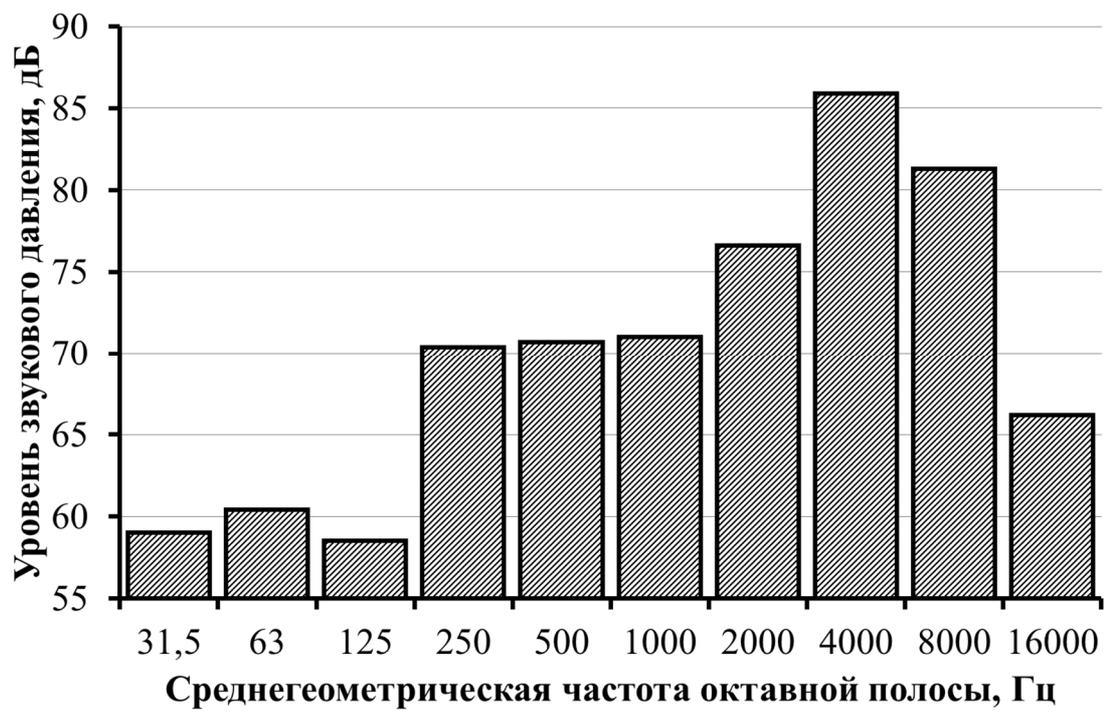


Рисунок 80 – Поправки, рассчитанные для пятого канала записи

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж - ОБОБЩЕННЫЕ ОКТАВНЫЕ СПЕКТРЫ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ ТРАКТОРА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЯ**



Рисунок 81 – Октавный спектр внешнего шума при использовании полой трубы

Таблица 21 - Октавные спектры внешнего шума при использовании полой трубы

Режим загрузки трактора	Значение среднегеометрической частоты октавной полосы частот, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Холостой ход	98,6	95,2	99,2	103,6	94,9	100,2	94,6	100,8	95,7	92,3
Буксировка К-701(трансмиссия отключена)	99,6	93,8	101	103,8	97,6	99,2	96,1	100,9	94,5	91,4
Буксировка К-701(III режим 4-я передача)	100,3	97,9	101,7	109,1	101,8	104,3	98,5	99,4	97,9	94,8
Буксировка К-701(III режим 3-я передача)	100,6	102,8	104,8	112	100,3	103,4	100,1	102,4	93,9	90,8
Буксировка К-701(III режим 2-я передача)	106	102,3	106,7	107,1	100,2	104,7	98,8	97,8	98,9	96,1
Буксировка К-701(III режим 1-я передача)	116,8	118,4	115	110,7	100,8	103,6	102,3	100,9	97,5	94,9

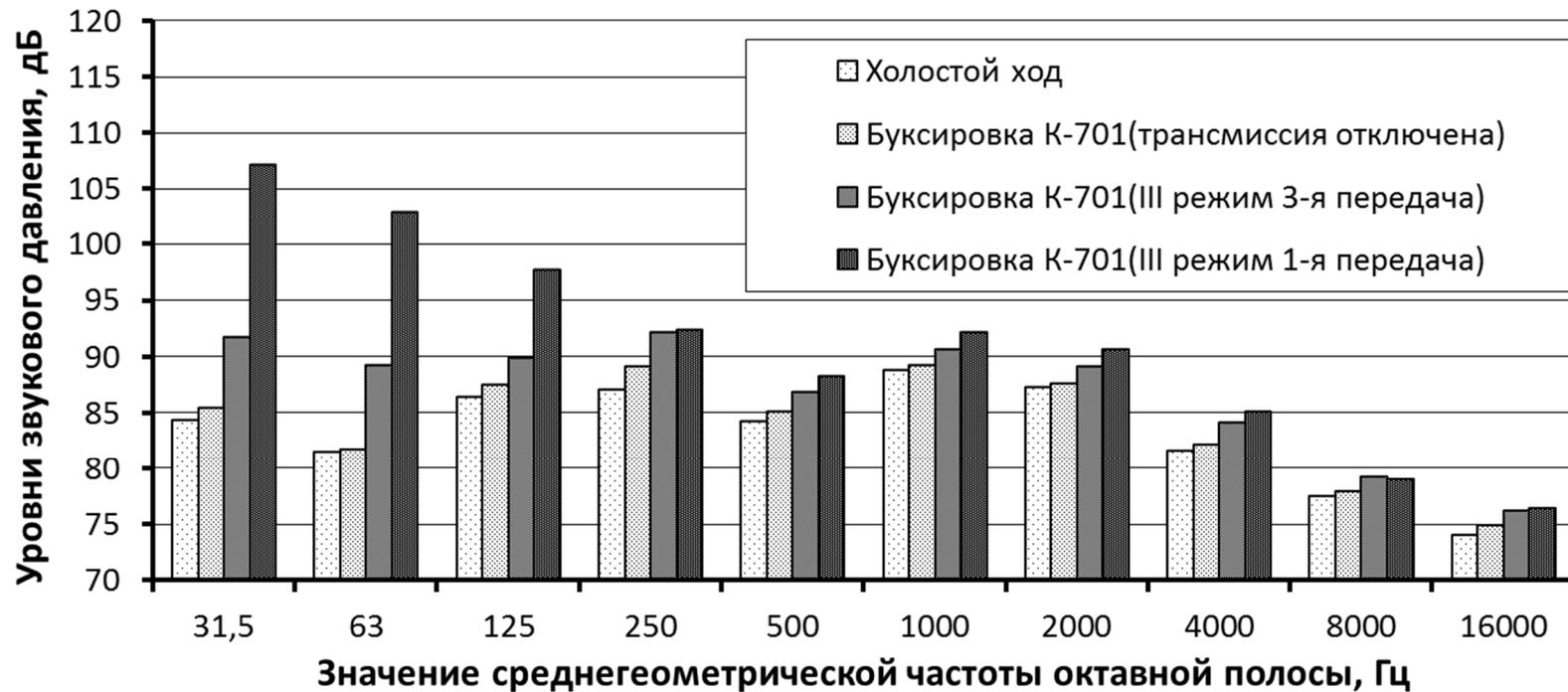


Рисунок 82 – Октавный спектр внешнего шума при использовании СГШ

Таблица 22 - Октавные спектры внешнего шума при использовании СГШ

Режим загрузки трактора	Значение среднегеометрической частоты октавной полосы частот, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Холостой ход	84,4	81,6	86,5	87,2	84,3	88,9	87,4	81,7	77,6	74,2
Буксировка К-701(трансмиссия отключена)	85,5	81,8	87,6	89,2	85,2	89,3	87,7	82,3	78,1	75
Буксировка К-701(III режим 4-я передача)	88,6	86	90	92,2	86,9	90,7	89,2	84,2	79,4	76,3
Буксировка К-701(III режим 3-я передача)	91,8	89,3	90	92,2	86,9	90,7	89,2	84,2	79,4	76,3
Буксировка К-701(III режим 2-я передача)	96,1	91,3	90,2	92,2	88,1	90,6	89,6	83,9	79,4	76,6
Буксировка К-701(III режим 1-я передача)	107,2	103	97,8	92,5	88,4	92,3	90,7	85,2	79,1	76,5

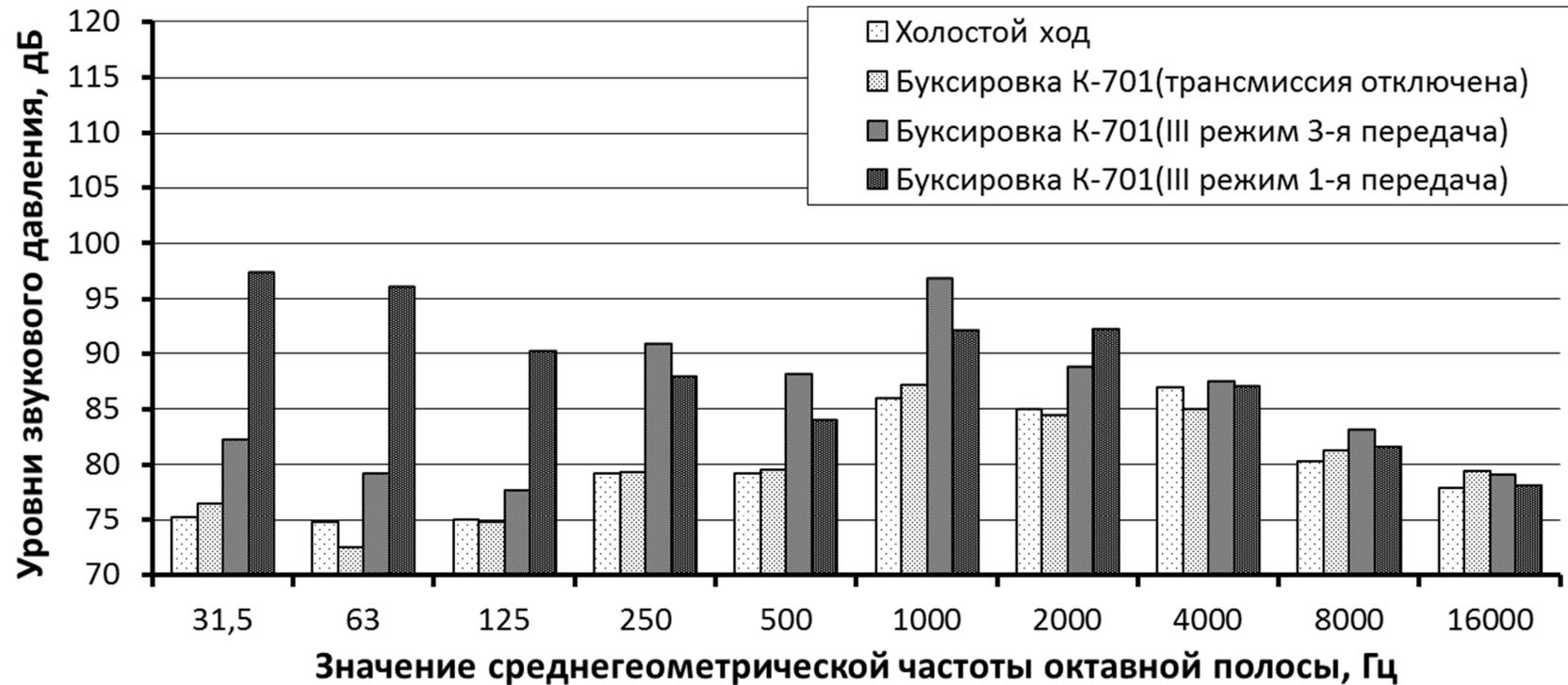


Рисунок 83 – Октавный спектр внешнего шума при использовании опытного глушителя

Таблица 23 - Октавные спектры внешнего шума при использовании опытного глушителя

Режим загрузки трактора	Значение среднегеометрической частоты октавной полосы частот, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Холостой ход	75,2	74,8	75	79,3	79,2	86	85	86,9	80,3	78
Буксировка К-701(трансмиссия отключена)	76,5	72,5	74,8	79,4	79,6	87,2	84,5	85	81,3	79,5
Буксировка К-701(III режим 4-я передача)	78,5	79,7	75,1	84,8	84,8	91,9	86,4	84	86,3	84,3
Буксировка К-701(III режим 3-я передача)	82,3	79,3	77,7	90,8	88,1	96,8	88,8	87,5	83,2	79,1
Буксировка К-701(III режим 2-я передача)	81,1	80	79,3	82,5	87,7	95	88,2	84,3	86,8	79,4
Буксировка К-701(III режим 1-я передача)	97,4	96,1	90,2	87,9	84	92,1	92,3	87,1	81,6	78,2

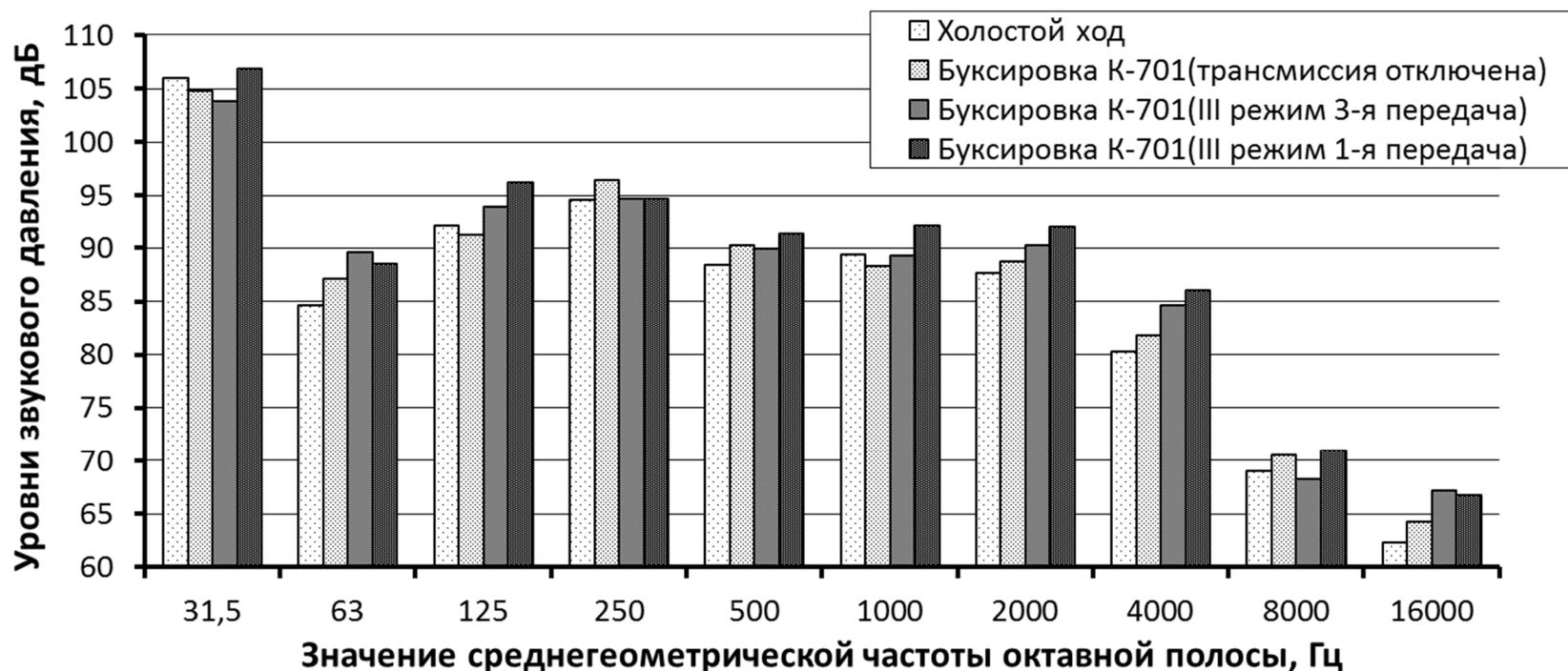


Рисунок 84 – Октавный спектр шума внутри кабины при использовании полой трубы

Таблица 24 - Октавные спектры внешнего шума внутри кабины при использовании полой трубы

Режим загрузки трактора	Значение среднегеометрической частоты октавной полосы частот, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Холостой ход	106	84,6	92,1	94,6	88,4	89,4	87,7	80,3	69	62,3
Буксировка К-701(трансмиссия отключена)	104,8	87,1	91,2	96,5	90,3	88,3	88,8	81,8	70,5	64,3
Буксировка К-701(III режим 4-я передача)	104,3	89,5	91,7	95,6	90,4	88	91,1	82,6	69,4	64,8
Буксировка К-701(III режим 3-я передача)	103,8	89,6	94	94,7	90	89,3	90,3	84,6	68,3	67,2
Буксировка К-701(III режим 2-я передача)	106,1	88,7	95,4	95,5	90,4	91,4	91	83,4	70,5	66,8
Буксировка К-701(III режим 1-я передача)	106,9	88,5	96,2	94,7	91,4	92,1	92	86,1	71	66,8

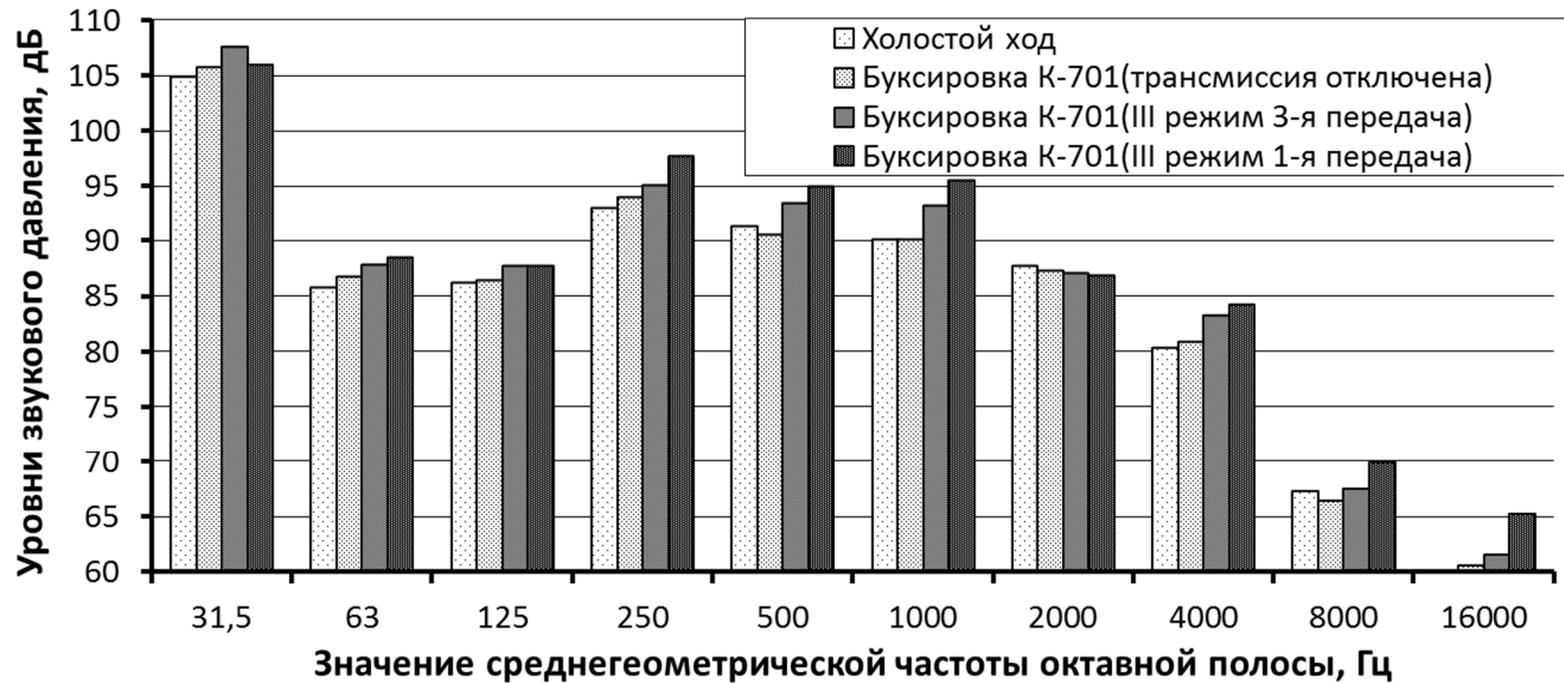


Рисунок 85 – Октавный спектр шума внутри кабины при использовании СГШ

Таблица 25 - Октавные спектры внешнего шума внутри кабины при использовании СГШ

Режим загрузки трактора	Значение среднегеометрической частоты октавной полосы частот, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Холостой ход	104,9	85,8	86,3	93,1	91,4	90,2	87,8	80,4	67,4	58,9
Буксировка К-701(трансмиссия отключена)	105,8	86,8	86,5	94,1	90,6	90,2	87,4	81	66,5	60,7
Буксировка К-701(III режим 4-я передача)	106,1	88,6	87,4	93,9	92,3	91,3	87,9	81,5	67,2	61,2
Буксировка К-701(III режим 3-я передача)	107,6	87,9	87,8	95,2	93,5	93,3	87,1	83,3	67,6	61,7
Буксировка К-701(III режим 2-я передача)	106,7	88,1	87,7	96,8	95,3	94,1	87	84,7	69,3	63,7
Буксировка К-701(III режим 1-я передача)	106	88,5	87,8	97,7	95	95,6	86,9	84,3	70	65,3

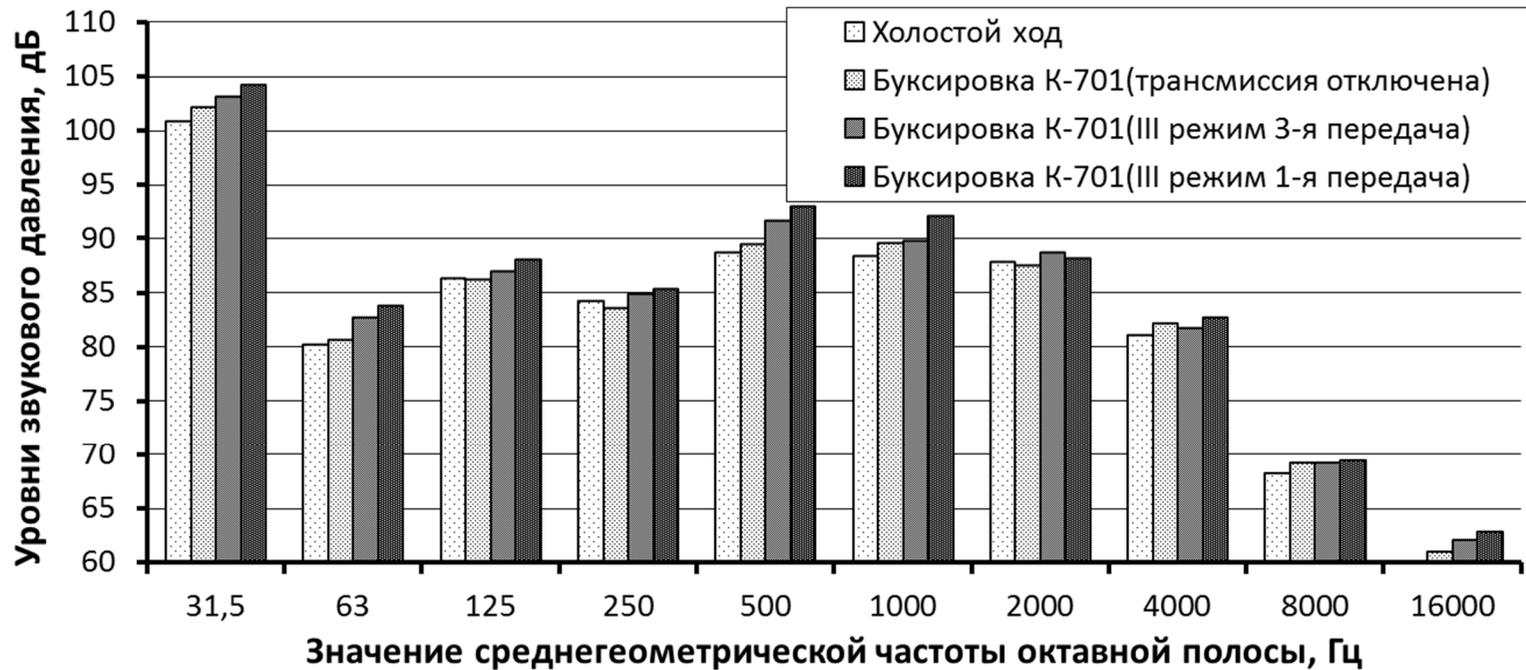


Рисунок 86 – Октавный спектр шума внутри кабины при использовании опытного глушителя

Таблица 26 - Октавные спектры внешнего шума внутри кабины при использовании опытного глушителя

Режим загрузки трактора	Значение среднегеометрической частоты октавной полосы частот, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Холостой ход	100,8	80,2	86,3	84,2	88,7	88,3	87,8	81,1	68,3	60
Буксировка К-701(трансмиссия отключена)	102,1	80,6	86,2	83,6	89,4	89,5	87,5	82,1	69,2	61
Буксировка К-701(III режим 4-я передача)	102,8	81,7	86,4	83,7	90,4	89,9	87,5	82,3	68,7	61,4
Буксировка К-701(III режим 3-я передача)	103,1	82,7	86,9	84,9	91,6	89,7	88,7	81,7	69,2	62,1
Буксировка К-701(III режим 2-я передача)	103,9	83,6	86,7	85,4	92,7	90,6	88,4	81,9	69,2	61,6
Буксировка К-701(III режим 1-я передача)	104,2	83,8	88	85,3	93	92	88,1	82,7	69,5	62,9

## ПРИЛОЖЕНИЕ И – РАССЧИТАННЫЕ УРОВНИ ВНЕШНЕГО ШУМА ВЫПУСКА, ФИКСИРУЕМЫЕ МИКРОФОНОМ

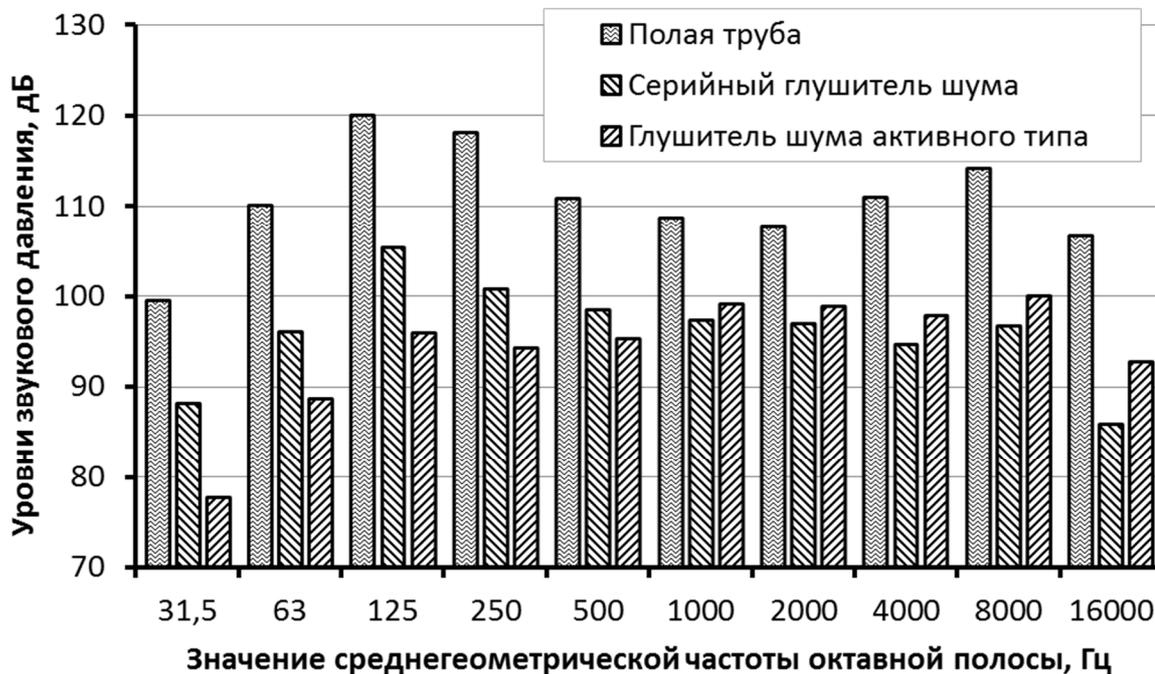


Рисунок 87 – Уровни шума выпуска при испытании на холостом режиме трактора

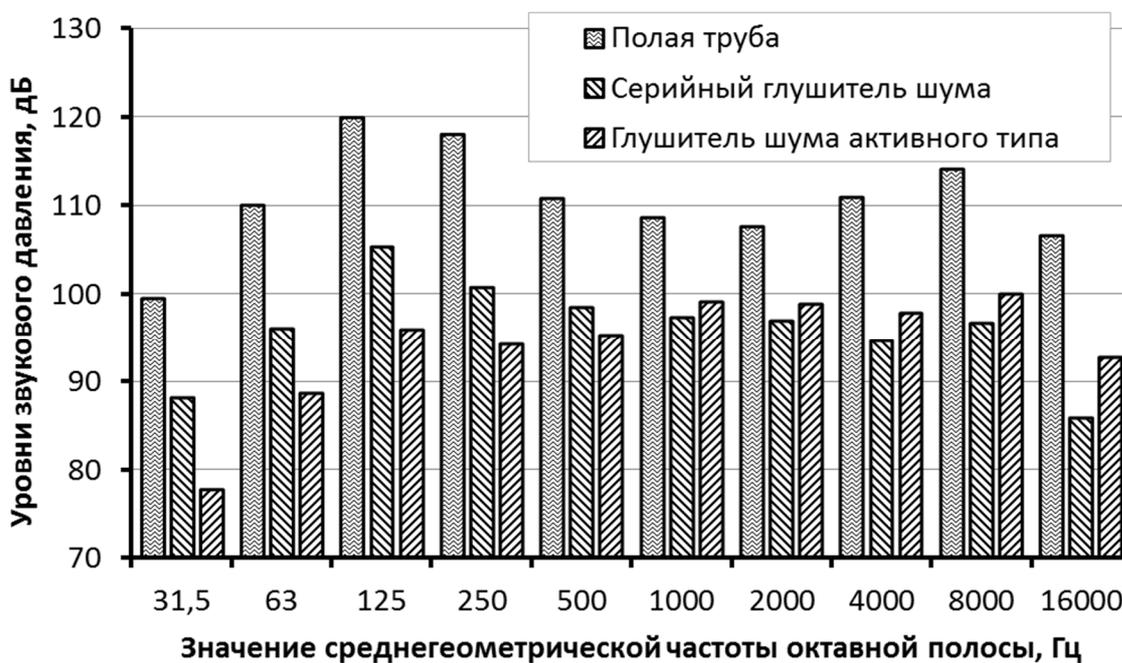


Рисунок 88 – Уровни шума выпуска при нагрузке на крюке 3,28 кН

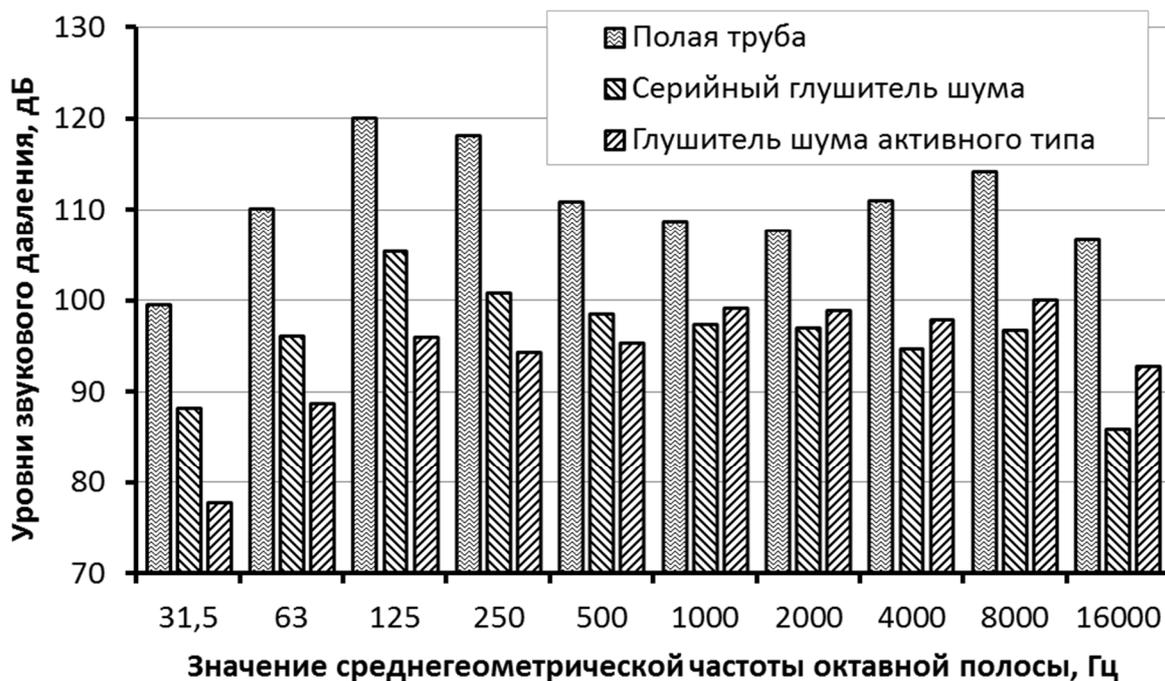


Рисунок 89 – Уровни шума выпуска при нагрузке на крюке 10,13 кН

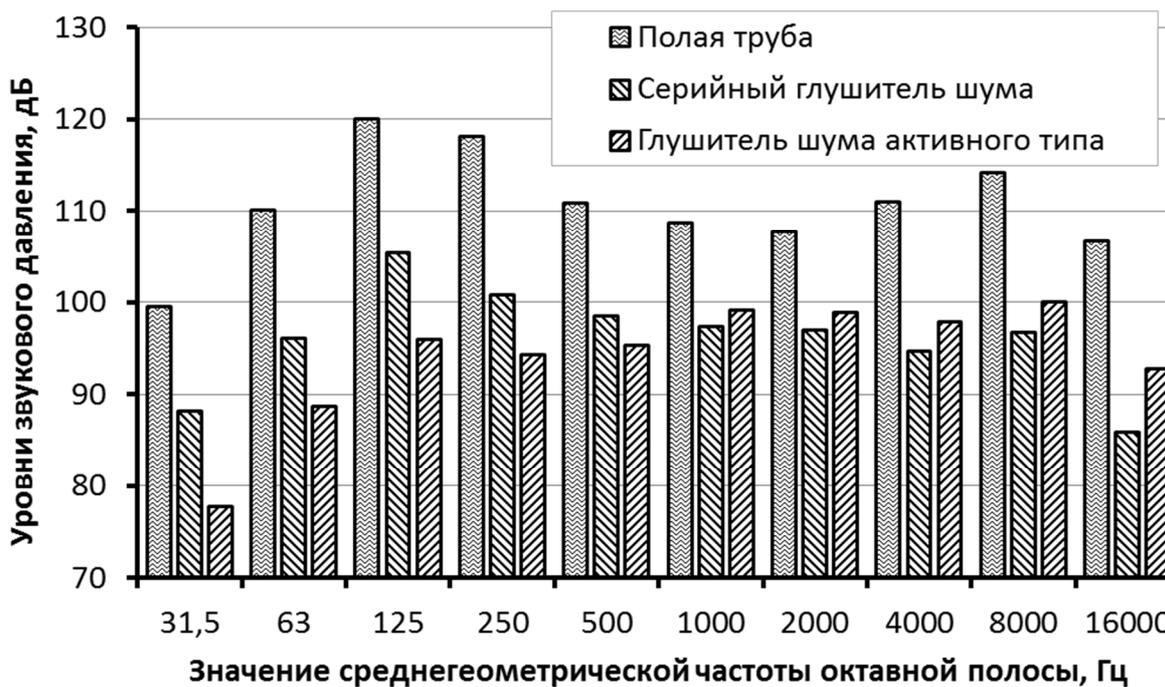


Рисунок 90 – Уровни шума выпуска при нагрузке на крюке 34,12 кН

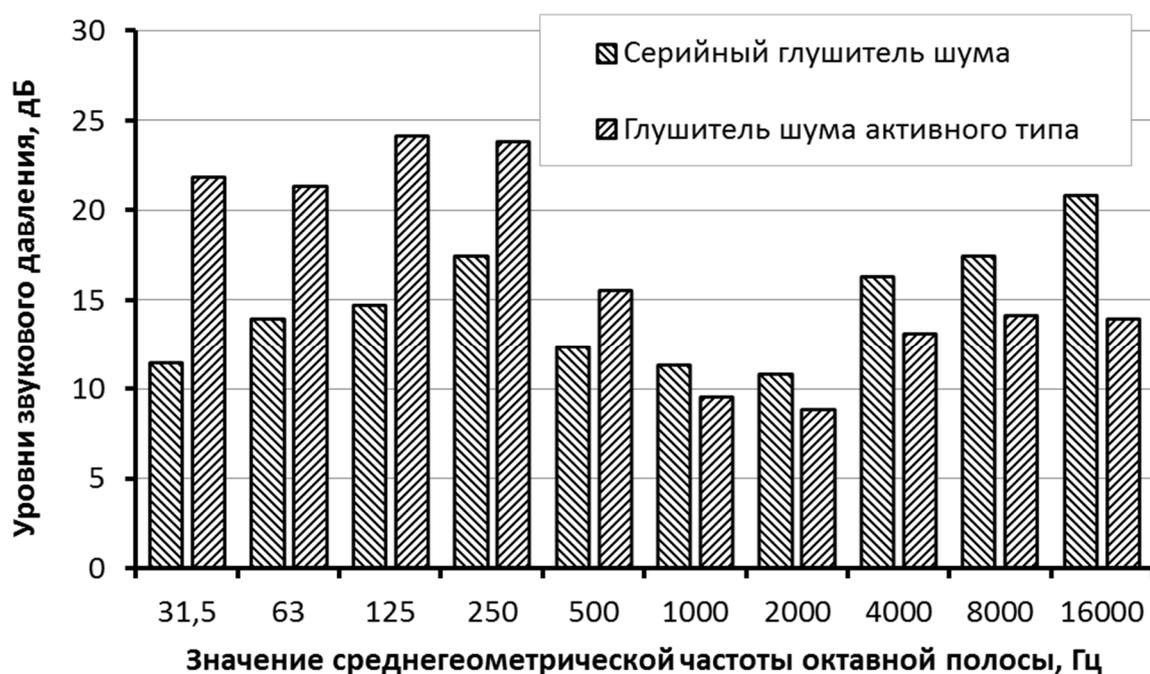


Рисунок 91 – Эффект применения глушителей при испытании на холостом режиме трактора

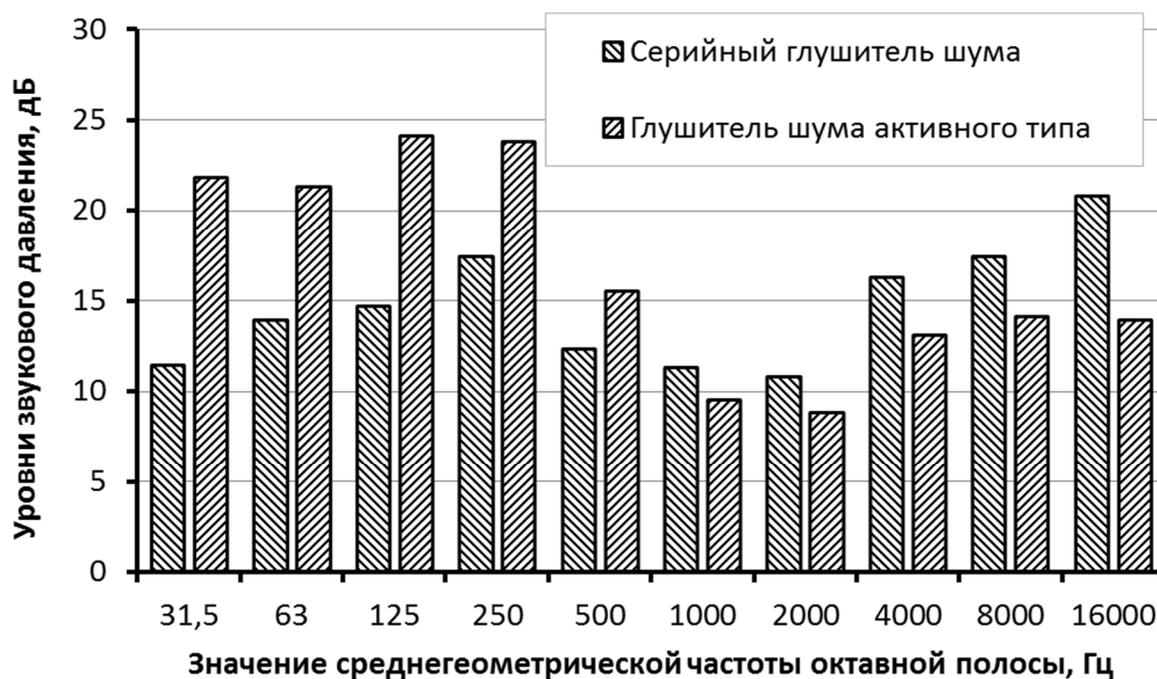


Рисунок 92 – Эффект применения глушителей при нагрузке 3,28 кН

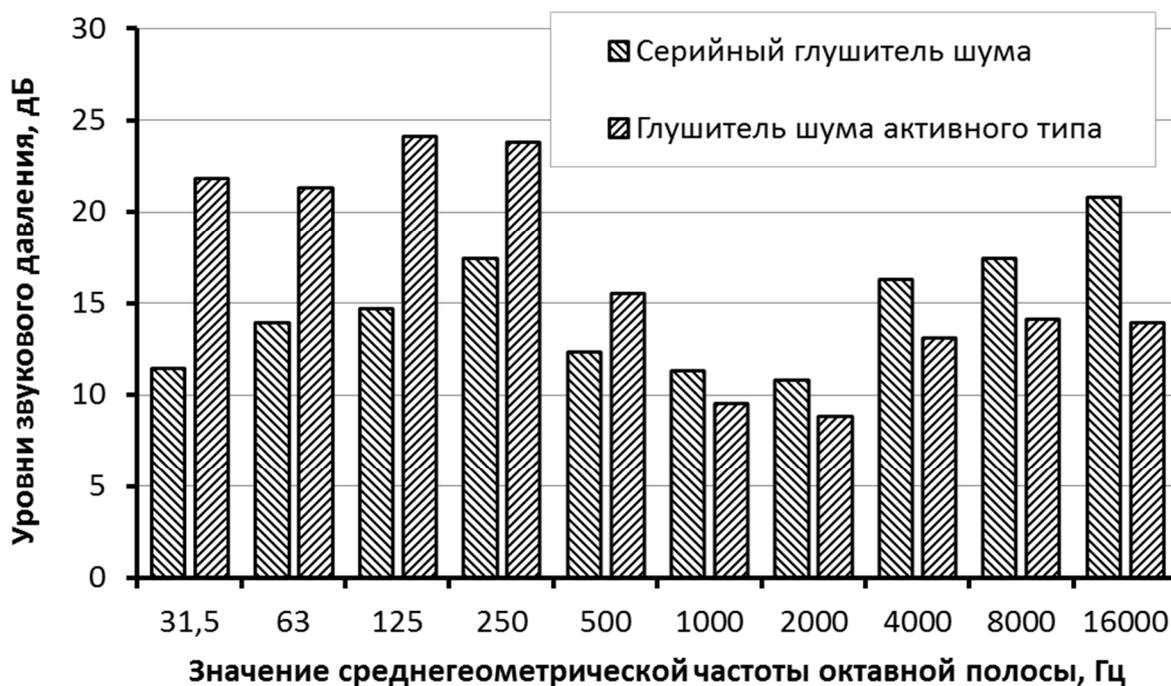


Рисунок 93 – Эффект применения глушителей при нагрузке 10,13 кН

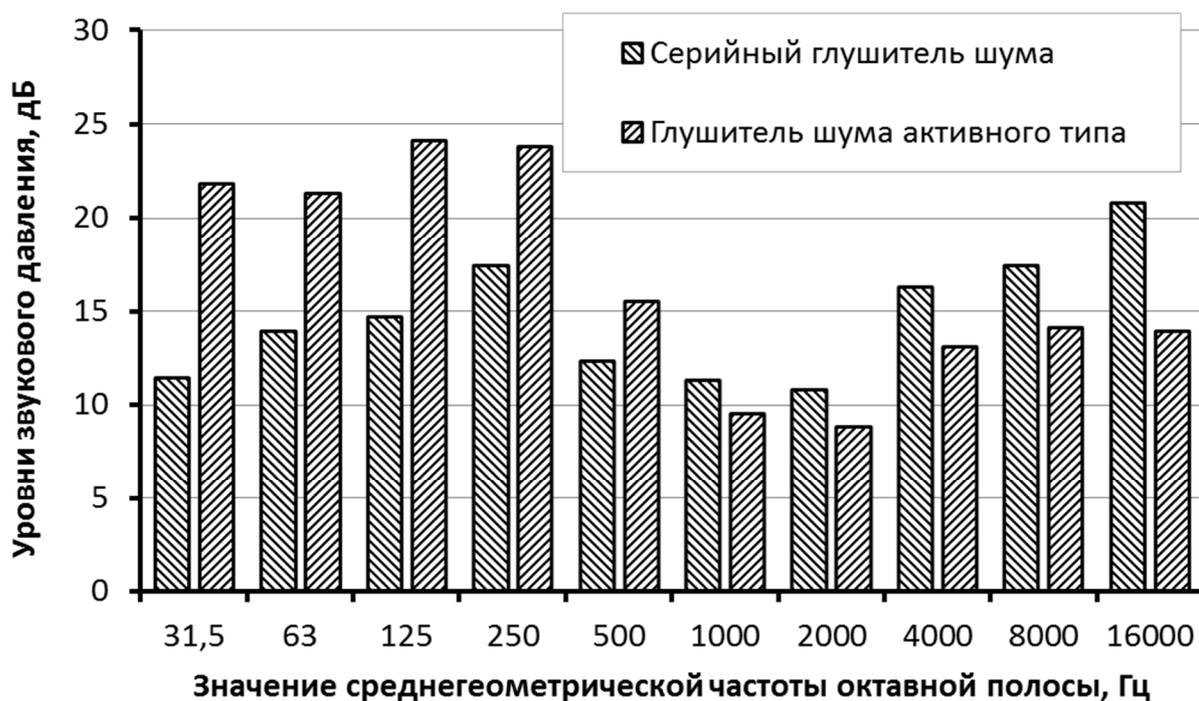


Рисунок 94 – Эффект применения глушителей при нагрузке 34,12 кН

## ПРИЛОЖЕНИЕ К – ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ РФ №2445505

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2445505

**ГЛУШИТЕЛЬ АКТИВНОГО ТИПА ДЛЯ  
АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Воронежский государственный аграрный университет имени К.Д. Глинки" (ФГОУ ВПО ВГАУ им. К.Д. Глинки) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010131485

Приоритет изобретения 27 июля 2010 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 марта 2012 г.

Срок действия патента истекает 27 июля 2030 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B.P. Simonov'.

*Б.П. Симонов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 445 505** <sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
*F02M 35/12* (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2010131485/06, 27.07.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
27.07.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.07.2010

(45) Опубликовано: 20.03.2012 Бюл. № 8

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: US 5513266 A, 30.04.1996. RU 2096651 C1,  
20.11.1997. DE 10322610 A1, 24.02.2005. EP  
1085199 A2, 21.03.2001. EP 0884471 A2,  
16.12.1998. US 2007205043 A1, 06.09.2007.

Адрес для переписки:

394087, г.Воронеж, ул. Мичурина, 1, ВГАУ  
им. К.Д. Глинки, зав. сектором защиты  
интеллектуальной собственности Л.В.  
Балбековой

(72) Автор(ы):

Поливаев Олег Иванович (RU),  
Кузнецов Алексей Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Воронежский государственный аграрный  
университет имени К.Д. Глинки" (ФГОУ  
ВПО ВГАУ им. К.Д. Глинки) (RU)

RU 2 4 4 5 5 0 5 C 1

## (54) ГЛУШИТЕЛЬ АКТИВНОГО ТИПА ДЛЯ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к машиностроению, преимущественно к двигателестроению, и может быть использовано в системах впуска и выпуска ДВС для активного подавления шума. Глушитель активного типа для автотракторных двигателей состоит из корпуса, включающего фронтальную и тыловую части. Соосно оси корпуса на опорной пластине установлен динамик с

образованием зазора между корпусом и диффузором не менее величины, выбранной из условия  $(0,2-0,15) \cdot d_k$ , где  $d_k$  - внутренний диаметр корпуса. С тыльной стороны динамик снабжен кожухом, выполненным с возможностью соединения его внутренней полости с впускным коллектором двигателя. При использовании изобретения повышается эффективность работы глушителя и увеличивается ресурс работы динамика. 1 ил.

RU 2 4 4 5 5 0 5 C 1

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Л – АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ В ОАО «ХРЕНОВСКОЙ КОННЫЙ ЗАВОД»**

### АКТ

о внедрении рекомендаций по результатам научно-исследовательской работы Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I

В ОАО «Хреновской конный завод» заслушаны результаты научно-исследовательской работы, полученные в Воронежском государственном аграрном университете имени императора Петра I (ВГАУ) по проблеме снижения уровней внешнего шума тракторов за счёт применения глушителей шума активного типа.

Работа выполнена аспирантом Кузнецовым А.Н., под руководством профессора Поливаева О.И.

Для снижения вредного воздействия шума процесса выхлопа на организм оператора, а также снижения уровней внешнего шума, излучаемого тракторами, исполнителями разработана конструкция глушителя шума активного типа, использующая один фронтальный динамик в качестве вторичного излучателя.

Результаты испытаний показали, что основной вклад как во внутреннее, так и во внешнее звуковое поле трактора оказывает шум процесса выпуска отработавших газов. Кроме этого, опыты показали, что при достаточно широком диапазоне пульсаций крюкового усилия двигатель сохраняет стационарность шумового сигнала с пиком в зоне основной частоты. Уровни звукового давления как внешнего, так и внутреннего шумов, при использовании вместо серийного глушителя шума активного типа, снижаются в среднем на 7-10 дБ в октавных полосах частот до 500 Гц, т.е. в низкочастотном диапазоне, в котором сосредоточена основная мощность спектра звукового излучения. Общая эффективность глушителя активного типа составляет 3-4 дБА.

Применение глушителя активного типа позволяет повысить производительность и качество работы машинно-тракторных агрегатов за

счёт снижения скорости утомления операторов от действия внутреннего шумового поля.

Генеральный директор

ОАО «Хреновской конный завод»



Р. Чаканс

# ПРИЛОЖЕНИЕ М – АКТ ПОВЕРКИ ШУМОМЕРА-АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА «ОКТАВА - 110А»

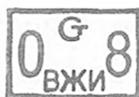
РЭ 4381-003-76596538-06

## ФОРМУЛЯР

Средство измерения Шумомер-анализатор спектра, виброметр  
портативный ОКТАВА-110А заводской № A081282

поверено и на основании результатов первичной (периодической)  
поверки признано годным к применению.

Поверительное клеймо



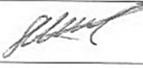
Руководитель метрологической службы  
ООО "ПКФ Цифровые приборы"

  
С.Ю. Макашов

Дата поверки: 27.06.13.Действительна до: 27.06.16.

### Результаты поверки

Предусилитель P200 зав. № 080094

первичный преобразователь	зав. №	калибровочная поправка	поверитель	подпись
микрофон <u>МК-265</u>	<u>964</u>	<u>-0,6</u>	<u>Макашов</u>	
микрофон				
акселерометр				
акселерометр трехкомпонентный		ось X: ось Y: ось Z:		

Метрологической службе ООО "ПКФ Цифровые приборы" приказом  
Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2168 от 07.08.2006  
предоставлено право поверки средств измерений.

Метрологическая служба ООО "ПКФ Цифровые приборы" зарегистрирована в Реестре  
аккредитованных метрологических служб юридических лиц под № 01260.

