

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУШИТЕЛЕЙ ШУМА АКТИВНОГО ТИПА

Алексей Николаевич Кузнецов, старший преподаватель кафедры тракторов и автомобилей

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Цель исследования – получение математического аппарата, позволяющего прогнозировать акустические характеристики глушителей шума активного типа. Объектом исследования является процесс формирования звукового поля глушителем шума выпуска активного типа. Предмет исследования – взаимосвязь геометрических параметров активных и пассивных элементов глушителя шума, а также параметров адаптивного алгоритма, заложенного в блок управления, с его эффективностью. В статье предложена новая методика определения эффективности глушителей шума активного типа, учитывающая влияние, оказываемое временными характеристиками исходного шума на параметры работы блока управления активными компонентами. Предлагаемая методика основывается на исследовании преобразований, происходящих с входным звуковым сигналом при его отражении и поглощении пассивными элементами глушителя, и его интерференции с созданной системой активного шумоподавления звуковой волной. Выполнен анализ глушителя шума, разбиваемого на две зоны: до и после области создания вторичных звуковых волн активными компонентами. Полученные зоны разложены на элементы простой геометрической формы, передаточные характеристики которых могут быть легко определены аналитически. Определены общие передаточные характеристики анализируемых зон и рассчитаны их импульсные представления. С помощью теоремы о свертке сигналов определены изменения, происходящие с входным сигналом при его прохождении через каждую из зон, описываемых импульсными характеристиками. Область активного шумоподавления представлена суммой амплитуд дошедшего исходного сигнала и вторичного сигнала, созданного алгоритмом блока управления. После получения сигнала на выходе выполнено сравнение октавных спектров исходного и выходного сигналов и определена общая эффективность глушителя. Данная методика основывается на математическом аппарате теории автоматического управления и цифровой обработке сигналов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** активное шумоподавление, глушители шума, методика, эффективность.

The objective of this study was to obtain a mathematical apparatus allowing to predict the acoustic characteristics of active-type noise suppressors. The object of research is the process of formation of an acoustic field by the active-type noise suppressor. The subject of research is the interrelation of geometrical parameters of active and passive elements of noise suppressor and the interrelation of the parameters of the adaptive algorithm preprogrammed in the control unit with its efficiency. The author proposes a new technique for determining the efficiency of active-type noise suppressors considering the impact exerted by temporary characteristics of baseline noise on operating parameters of the unit controlling the active components. The proposed technique is based on the study of transformations of input sound signal when it is reflected and absorbed by passive elements of noise suppressor and its interference with active noise reduction by a sound wave created by the system. The author has analyzed a noise suppressor divided into two zones before and after the area of creation of secondary sound waves by active components. The obtained zones are split into elements with simple geometrical form with transfer characteristics that can be easily defined analytically. The author has also defined the general transfer characteristics of the analyzed zones and calculated their impulse representations. Using the signal convolution theorem the author determined the changes happening to the input signal at passing through each zone described by impulse characteristics. The area of active noise reduction is represented by the sum of amplitudes of the received baseline signal and secondary signal created by the algorithm of the control controlling unit. After receiving the signal at the output a comparison of octave spectra of baseline and output signals was performed and the overall efficiency of noise suppressor was determined. This technique is based on the mathematical apparatus of the theory of automatic controlling and digital processing of signals.

**KEY WORDS:** active noise control, noise suppressors, technique, efficiency.

**В**ведение. В настоящее время значительно ужесточились требования к микроклимату и комфортности рабочих мест операторов мобильных энергетических средств. Этот факт побуждает производителей применять наиболее современные и технологичные методы снижения как внешнего, так и внутреннего шума, создаваемого их техникой [8]. Если учесть, что наиболее интенсивным источником шума машинно-тракторного

агрегата является процесс выпуска отработавших газов, то разработка эффективного глушителя шума становится весьма актуальной задачей.

Современный глушитель шума выхлопа мобильных энергетических средств должен обладать значительной эффективностью при минимальном объеме, массе, противодействии и стоимости [1, 7]. Для стандартных глушителей шума пассивного типа (рис. 1) данные требования противоречат друг другу, так как их эффективность напрямую связана со всеми тремя параметрами. Например, чем больше размер реактивного глушителя, тем выше результативность его работы, для качественных резонаторных глушителей характерно высокое противодействие, а для активных – высокая масса и, при равной эффективности, высокая стоимость.

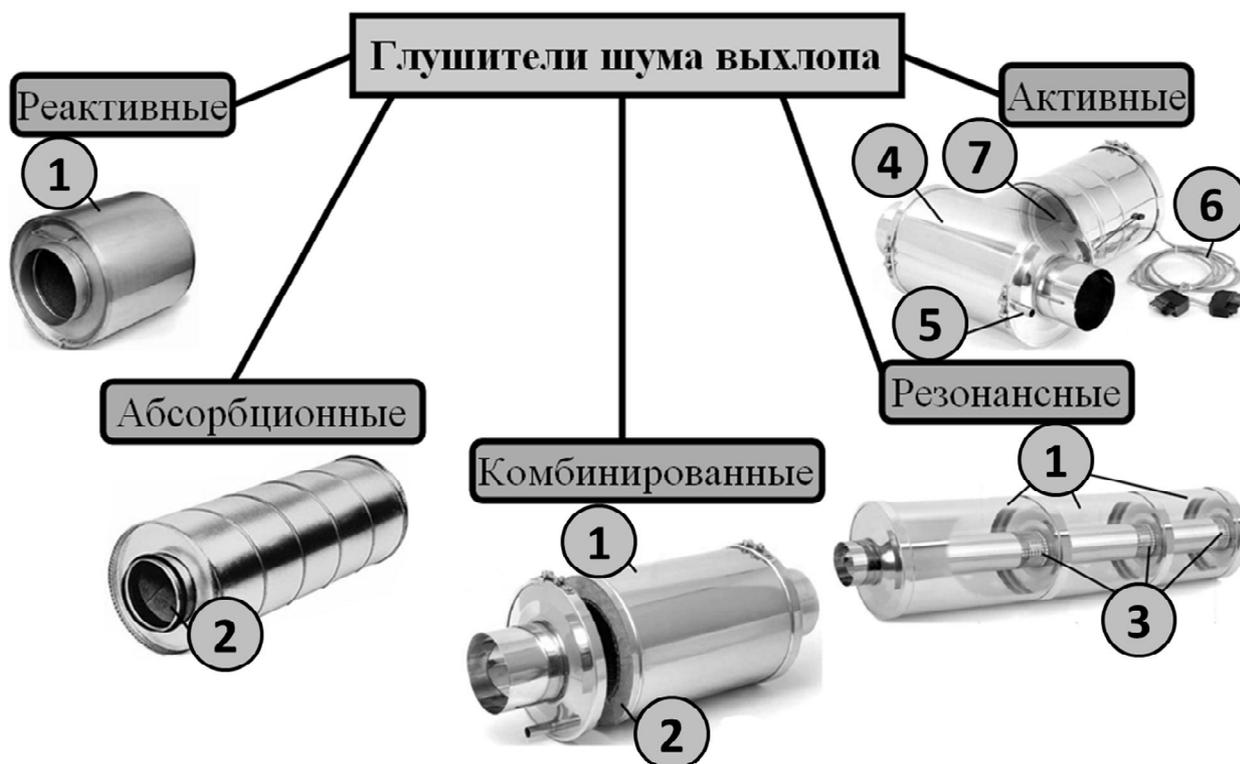


Рис. 1. Классификация глушителей шума и их характеристики эффективности: 1 – расширительная камера; 2 – звукопоглощающий материал; 3 – отверстия в трубе; 4 – канал; 5 – отвод; 6 – сигнальные провода; 7 – динамик

В данном случае одним из наиболее перспективных решений является применение системы активного шумоподавления в глушителе [3]. Использование такой системы позволяет достичь высокой эффективности работы без необходимости использовать значительные габариты и дорогостоящие материалы, а также приводит к снижению потерь мощности двигателя, возникающих вследствие сопротивления движению потока выхлопных газов.

**Цель исследования** – получение математического аппарата, позволяющего прогнозировать акустические характеристики глушителей шума активного типа.

**Объектом исследования** является процесс формирования звукового поля глушителем шума выпуска активного типа.

**Предмет исследования** – взаимосвязь геометрических параметров активных и пассивных элементов глушителя шума, а также параметров адаптивного алгоритма, заложенного в блок управления, с его эффективностью.

Работа системы активного подавления шума (рис. 2) заключается в фиксации датчиком 1 опорного звукового сигнала на входе в глушитель и датчиком 3 остаточного звукового сигнала в зоне выхода потока выхлопных газов. В результате обработки блоком управления 2 этих сигналов формируется дополнительный сигнал, который через усилитель отправляется в громкоговоритель 4, генерирующий вторичный звуковой сигнал. В результате акустического взаимодействия опорного и вторичного звуковых сигналов образуется новое значение остаточного сигнала. После этого по некоторому алгоритму изменяются управляющие параметры блока управления 2, влияющие на формирование вторичного сигнала, и процесс повторяется [2].

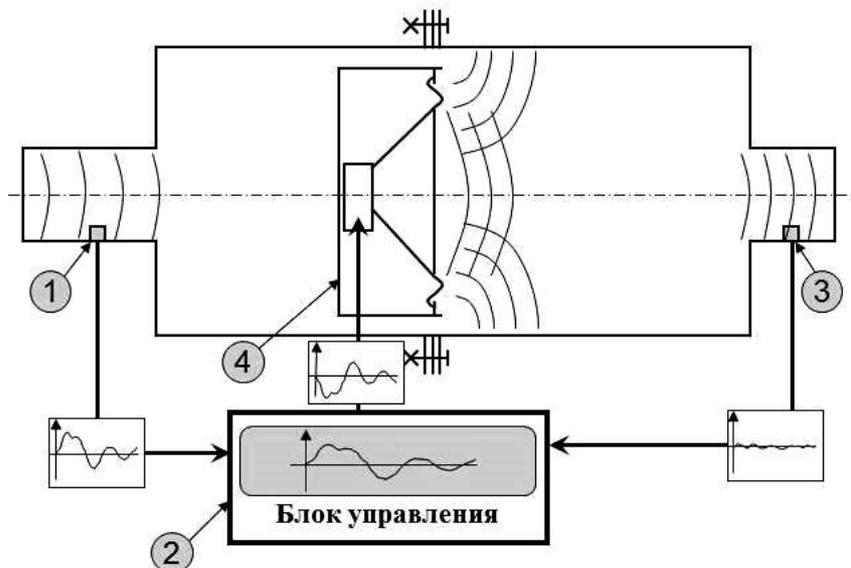


Рис. 2. Работа системы активного подавления шума в глушителе:  
 1 – датчик опорного сигнала; 2 – блок управления;  
 3 – датчик остаточного сигнала; 4 – громкоговоритель

Для использования данной системы в глушителе шума необходимо установить два защищенных микрофона и, как минимум, один динамик. Диапазон частот, в котором система с одним фронтально расположенным динамиком эффективно снижает звуковые колебания, определяется из следующего уравнения [6]:

$$f \leq \frac{1,84 \cdot c}{\pi \cdot D_k}, \quad (1)$$

где  $D_k$  – диаметр канала, м;  
 $c$  – скорость звука в канале, м/с.

Для достижения наибольшей эффективности применения системы активного шумоподавления в глушителе следует соответствующим образом подобрать геометрические характеристики основных его элементов и алгоритма управления. Для этого необходимо иметь математическую модель, которая позволила бы определить эффективность глушителя при некоторых заданных входных параметрах.

В настоящее время разработан достаточно сложный математический аппарат [9], позволяющий с высокой (для акустики) точностью получать характеристики пассивных глушителей шума. При этом не существует методик, позволяющих построить адекватную модель глушителя шума, использующего систему активного шумоподавления.

Дело в том, что разработанные методики предусматривают рассмотрение характеристик глушителей лишь в частотной области, в то время как эффективность системы ак-

тивного подавления шума зависит от временных характеристик исходного шумового сигнала. Например, стационарные низкочастотные сигналы могут подавляться практически полностью, а сигналы, с быстроизменяющимся значением пиковой частоты или имеющие выраженный высокочастотный характер, могут даже усиливаться. Поэтому при определении эффективности глушителей шума активного типа необходимо разрабатывать математическую модель, оперирующую как в частотной, так и во временной областях.

Для примера рассмотрим алгоритм вычисления эффективности глушителя шума с одним фронтальным динамиком, представленного на рис. 3.

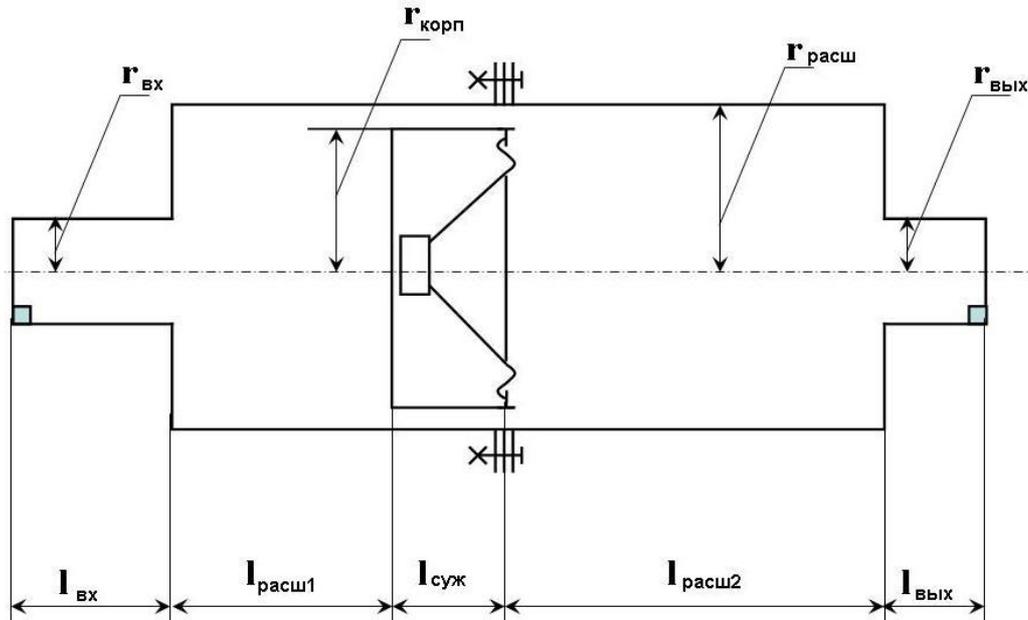


Рис. 3. Глушитель шума активного типа:

$r_{вх}$  – 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

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. Отбрасываем влияние квантования сигнала по амплитуде при аналогово-цифровом преобразовании и недостатки целочисленной арифметики блока управления.
6. Амплитудно-частотные характеристики усилителя и громкоговорителя принимаются линейными.
7. Принимаем, что расположенный в глушителе громкоговоритель не создает дополнительного механического сопротивления в области расширения.

В качестве переменных для оптимизации используются только те 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).

**Методика расчета акустической эффективности глушителя шума активного типа**

Вначале принимаются значения всех геометрических параметров глушителя (представлены на рис. 3). Кроме этого, определяется звуковой файл, который будет использоваться для нахождения оптимальных 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.

Вторым этапом является определение импульсных характеристик передней и задней частей глушителя (рис. 4).

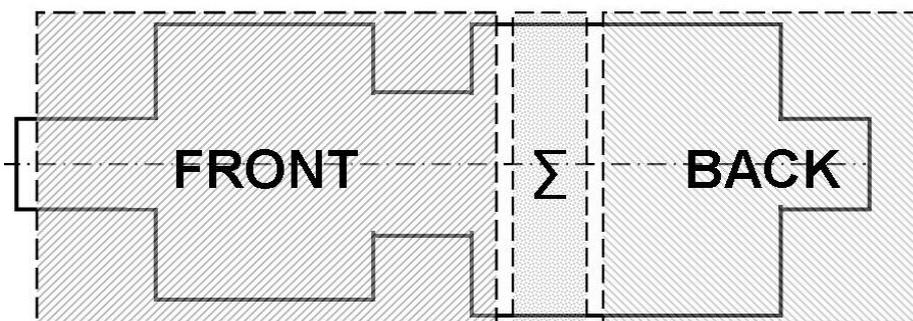


Рис. 4. Структурная модель глушителя шума активного типа:  
**FRONT** – передняя часть глушителя; **BACK** – задняя часть глушителя;  
 $\Sigma$  – зона акустического суммирования

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 (рис. 3), с целью упрощения заменена внезапным сужением с аналогичной площадью сечения.

Теперь каждая зона разбивается на отдельные участки простейшей формы с постоянным сечением (рис. 5).

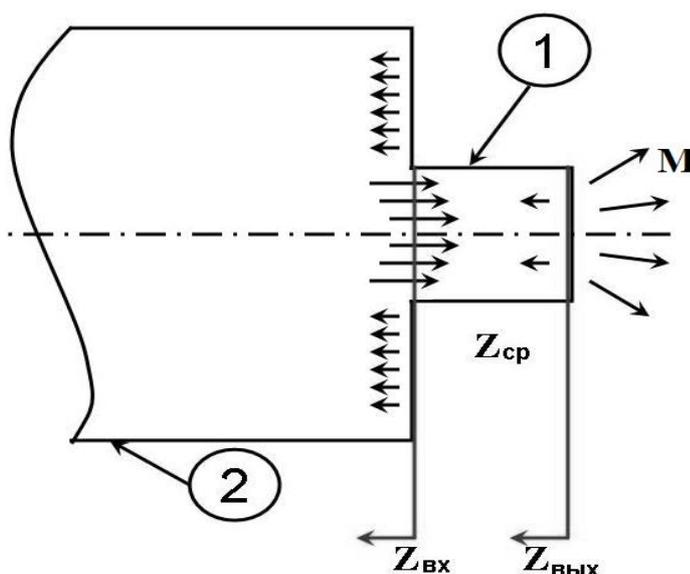


Рис. 5. Структурная схема задней части глушителя:  
 1 – выпускной патрубков; 2 – расширительная часть

Для каждого такого участка определяем следующие показатели.

1. Импеданс среды:

$$Z_{cp} = S \cdot \rho \cdot c, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь сечения данной части глушителя, м<sup>2</sup>;

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

$c$  – скорость звука в потоке отработавших газов, м/с.

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

Для выпускного патрубка:

$$Z_{вых} = Z_{cp} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot J_1(2 \cdot k \cdot r_{вых})}{2 \cdot k \cdot r_{вых}} + i \cdot \frac{S_1(2 \cdot k \cdot r_{вых})}{k \cdot r_{вых}} \right], \quad (3)$$

где  $k$  – волновое число;

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

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

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

$i$  – комплексное число, равное  $i = \sqrt{-1}$ .

Для зон сужений и расширений:

$$Z_{вых} = \left( \frac{S}{S_{пред}} \right)^2 \times (Z_{вх.пред} - i \cdot 2\pi \cdot f \cdot M), \quad (4)$$

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 следующего уравнения:

$$M = \frac{S^2}{4 \cdot r \cdot \Phi(r_{пред}/r)}, \quad (5)$$

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

$\Phi(x)$  – функция Фока. Определяется из следующей зависимости [4]:

$$\Phi(\xi) = 1 - 1,41\xi + 0,34\xi^3 + 0,07\xi^5. \quad (6)$$

3. Входной импеданс, который определяется из следующей зависимости:

$$Z_{вх} = Z_{cp} \times \frac{Z_{вых} \cdot ch(k \cdot l) + i \cdot Z_{cp} \cdot sh(k \cdot l)}{Z_{cp} \cdot ch(k \cdot l) + i \cdot Z_{вых} \cdot sh(k \cdot l)}, \quad (7)$$

где  $l$  – длина исследуемой зоны, м.

4. Комплексный коэффициент отражения

$$R_{отр} = \frac{Z_{вых} - Z_{cp}}{Z_{вых} + Z_{cp}}. \quad (8)$$

Также определяются амплитуды  $R$  и сдвиг фазы  $\varphi$  для каждой частоты

$$\begin{cases} |R| = \sqrt{\text{Re}(R)^2 + \text{Im}(R)^2} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(R)}{\text{Re}(R)}\right) \end{cases}. \quad (9)$$

5. Комплексный коэффициент прохождения волн.

Сначала определяем амплитудный спектр

$$|W| = 1 - |R|. \quad (10)$$

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

$$W = |W| \cdot e^{i\varphi}. \quad (11)$$

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

$$K = \prod_{j=1}^n W_j, \quad (12)$$

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  $X^{BACK}$

$$\begin{cases} X_j^{FRONT} = K^{FRONT} \left( \frac{j}{2 \cdot (N-1)} \cdot f_{дискр} \right) \\ X_j^{BACK} = K^{BACK} \left( \frac{j}{2 \cdot (N-1)} \cdot f_{дискр} \right) \end{cases} j \in 0 \dots N-1, \quad (13)$$

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

$$\begin{cases} FRONT_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k^{FRONT} \cdot e^{\frac{2\pi i}{N} \cdot k \cdot j} \\ BACK_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k^{BACK} \cdot e^{\frac{2\pi i}{N} \cdot k \cdot j} \end{cases} j \in 0 \dots N-1. \quad (14)$$

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

$$OUT_k = \sum_{j=0}^{N-1} FRONT_j \cdot INPUT_{k-j}, \quad (15)$$

где  $OUT$  – вектор амплитуд сигнала, полученного прохождением исходного звукового сигнала  $INPUT$  через переднюю зону глушителя, обозначенную на рисунке 4 знаком  $FRONT$ .

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

Структура адаптивного алгоритма выглядит следующим образом [5]:

1. Оптимальные характеристики адаптивного алгоритма принимаем из литературных источников ( $N = 128$ ) [6]. Используя заранее полученные векторы опорного сигнала (*OUT*) и весовых коэффициентов фильтра (*W*), получаем новое значение амплитуды вторичного сигнала (*Y*) их сверткой

$$Y_k = \sum_{j=0}^{N-1} OUT_{k-j} \cdot W_j(k), \quad (16)$$

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

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

$$OST_k = OUT_k + Y_k. \quad (17)$$

3. Рассчитываем мощность опорного сигнала (*OUT*) и определяем значение фактора сходимости ( $\mu$ )

$$\begin{cases} POW(k) = \sum_{j=0}^{N-1} OUT_j^2 \\ \mu(k) = \frac{N-1}{POW} \end{cases}. \quad (18)$$

4. Обновляем значение вектора весовых коэффициентов для следующего цикла расчетов

$$W_j(k+1) = W_j(k) + 2 \cdot \mu(k) \cdot OUT_k \cdot OST_k. \quad (19)$$

Результатом обработки адаптивным алгоритмом опорного сигнала является вектор остаточного шума (*OST*). Этот вектор содержит амплитуды звукового сигнала, полученные прохождением опорного сигнала (*OUT*) через зону акустического суммирования звуковых волн, обозначенную на рисунке 4 знаком  $\Sigma$ .

На четвертом этапе производим свертку вектора остаточного шума (*OST*) с импульсной характеристикой тыльной части глушителя (*BACK*), что в частотной области соответствует фильтрации спектра остаточного шума передаточной функцией тыльной части глушителя

$$OUTPUT_j = \sum_{k=0}^{N-1} BACK_k \cdot OST_{j-k}, \quad (20)$$

где *OUTPUT* – вектор амплитуд сигнала, полученного прохождением остаточного звукового сигнала *OST* через заднюю зону глушителя, обозначенную на рис. 4 знаком *BACK*.

В результате получаем вектор амплитуд звукового сигнала, выходящего из глушителя. После этого производим преобразование Фурье исходного (*INPUT*) и выходного (*OUTPUT*) шумов

$$\begin{cases} S_k^{INPUT} = \sum_{j=0}^{N-1} INPUT_j \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot i}{N} \cdot k \cdot j} \\ S_k^{OUTPUT} = \sum_{j=0}^{N-1} OUTPUT_j \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot i}{N} \cdot k \cdot j} \end{cases}, k \in 0 \dots N-1. \quad (21)$$

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

$$\begin{cases} NOISE_F^{INPUT} = 10 \cdot \lg \left[ \sum_{j=1}^m (S_{a+j}^{INPUT})^2 \right] \\ NOISE_F^{OUTPUT} = 10 \cdot \lg \left[ \sum_{j=1}^m (S_{a+j}^{OUTPUT})^2 \right] \end{cases}, F \in 1 \dots B, \quad (22)$$

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 узкополосного спектра, находящихся в границах октавной полосы с номером  $F$ .

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

$$RESULT = 10 \cdot \lg \left( \sum_{F=1}^B 10^{\frac{NOISE_F^{INPUT} - NOISE_F^{OUTPUT}}{0,1}} \right). \quad (23)$$

Изменяя геометрические характеристики глушителя, принятые в начале расчета, и рассчитывая соответствующее значение эффективности, производим поиск параметров глушителя, при которых наблюдается наивысшая его эффективность.

Разработанная методика показывает основной принцип расчета эффективности глушителей шума активного типа и поиска его параметров, при которых наблюдается пик эффективности.

#### Список литературы

1. Аэрогидромеханический шум в технике / Отв. ред. Хиклинг Р. – Москва : Мир. – 1980. – 336 с.
2. 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 науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – Воронеж : ФГБОУ ВПО ВГАУ. – 2014. – Ч. 3. – С. 77–84.
3. Кузнецов А.Н. Перспективы использования систем активного шумоподавления / А.Н. Кузнецов, О.И. Поливаев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2010. – Вып. 1 (24). – С. 46–48.
4. Лепендин Л.Ф. Акустика : учеб. пособие для ВТУЗов / Л.Ф. Лепендин. – Москва : Высшая школа, 1978. – 448 с.
5. Поливаев О.И. Математическое моделирование процесса активного подавления пульсаций потока выхлопных газов мобильных энергетических средств / О.И. Поливаев, В.С. Воищев, А.Н. Кузнецов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2012. – Вып. 2 (33). – С. 94–100.
6. Поливаев О.И. Определение зоны эффективности активного подавления шума, распространяющегося по осесимметричным конструкциям / О.И. Поливаев, А.Н. Кузнецов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2014. – Т. 2. – № 3-4 (8-4). – С. 451-455.
7. Поливаев О.И. Очиститель отработавших газов дизеля / О.И. Поливаев, В.А. Байбарин, А.В. Божко // Тракторы и сельхозмашины. – 2007. – № 6. – С. 10–14.
8. Поливаев О.И. Тракторы и автомобили. Теория и эксплуатационные свойства / О.И. Поливаев, В.П. Гребнев, А.В. Воробин. – Москва : Кнорус, 2011. – 264 с.
9. Старобинский Р.Н. Теория и синтез глушителей шума для систем впуска и выпуска газов двигателей внутреннего сгорания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Р.Н. Старобинский. – Москва, 1983. – 24 с.