

С. В. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, В. Е. ТОЛЬСКИЙ

*Государственный научно-исследовательский центр Российской Федерации по автомобильной технике Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (ГНЦ НАМИ)
125438, Москва, ул. Автомоторная, д. 2, e-mail: zoruhh@cityline.ru*

Автомобильные глушители: современные требования, тенденции развития, методы расчета и испытаний

Получена 17.08.2001, опубликована 08.10.2001

АННОТАЦИЯ

1. Постоянное ужесточение международных норм на внешний шум автомобиля требует проведения углубленных исследований по совершенствованию акустических характеристик систем выпуска автомобильных двигателей.
2. В статье сформулированы общие требования, предъявляемые к системам выпуска автомобильных двигателей.
3. Приведена методика и примеры расчетного определения акустических характеристик системы выпуска автомобильных двигателей на стадии ее проектирования.
4. Изложена методика экспериментальной оценки достаточного заглушения системы выпуска для достижения заданного уровня внешнего шума автомобиля.
5. Проведен сравнительный анализ автомобильных глушителей реактивного и реактивно-активного типов.

ABSTRACT

1. The international requirements for vehicles noise levels become more and more stringent. In this situation the deep researches of the exhaust system acoustic characteristics are required.
2. In this article the general requirements to exhaust system of automobile engines are examined.
3. The method and examples of calculation of the exhaust system acoustic characteristics are presented.
4. The experimental technique for determination of required exhaust system efficiency is suggested.
5. The comparative analysis of the automobile reactive mufflers and mufflers with active filler is carried out.

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВНЕШНЕМУ ШУМУ АВТОМОБИЛЯ

За последние годы в Европейских развитых странах отмечается большой прогресс в снижении шума легковых автомобилей. Это было достигнуто за счет постоянного уменьшения допустимых уровней внешнего шума и обеспечено развитием новых технологий по снижению шума. Шум новых легковых автомобилей за 25 лет уменьшился на 10–12 дБА. В 1994 г. вступила в силу поправка 02 к Правилам ЕЭК ООН №51. В 2003–05 годах предполагается введение поправки 03. Основные отличия введенных и вводимых в действие поправок к Правилам ЕЭК ООН заключаются в следующем:

- ужесточение на 2–5 дБА допустимых уровней звука;
- введение методики подготовки глушителей, имеющих набивку волокнистыми материалами, к акустическим испытаниям (проверка на выдувание);
- включение во все Правила требований к испытательному участку дороги для проведения испытаний на внешний шум;
- набивка глушителей не должна содержать асбеста

В России до 1999 г. действовала поправка 01 к Правилам ЕЭК ООН №51, т. е. для легковых автомобилей при разгоне на второй и третьей передачах от 50 км/ч на измерительном участке длиной 20 м предусмотрен средний уровень внешнего шума на расстоянии 7,5 м от оси автомобиля равный 77 дБА. С 1999 года вступила в силу Поправка 02, т. е. уровень шума должен быть понижен до 74 дБА.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ЗАГЛУШЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВЫПУСКА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Во внешнем шуме легкового автомобиля при разгоне одно из первых мест занимает шум системы выпуска отработавших газов двигателя. Отвод газов от двигателя осуществляется через нейтрализаторы, трубопроводы, глушители. Правильно выбранный по акустическим показателям глушитель позволяет существенно снизить затраты на снижение шума автомобиля в целом.

Для детального анализа заглушения, создаваемого системой выпуска двигателя, необходимо располагать спектрами незаглушенного и допустимого шума. В качестве исходного принимается спектр шума системы выпуска автомобиля-аналога без глушителя. На рис. 1 показано расположение микрофона при измерениях внешнего шума и шума системы выпуска двигателя, а в табл. 1 представлены данные по незаглушенному шуму легкового автомобиля с бензиновым двигателем объемом 2,5 л на расстоянии 0,5 м от среза выхлопной трубы при разгоне на второй передаче, измеренные в соответствии с методикой. Как правило, наибольший уровень шума системы выпуска автомобильных ДВС наблюдается на частоте 125 Гц и в полосе частот 1000–1500 Гц. Повышенный шум на частоте 125 Гц обусловлен рабочим процессом, происходящим в двигателе, а шум в полосе частот 1000–1500 Гц вызван шумом потока отработанных газов, проходящих по системе выпуска двигателя с высокой скоростью.

Шум незаглушенного двигателя измерялся на автомобиле при полной длине системы выпуска, но вместо глушителей устанавливались отрезки труб. Этот прием упрощает организацию измерений, несмотря на то, что резонаторы и глушитель должны снижать шум двигателя на выходе из приемной трубы, и спектр шума должен быть получен именно с этой трубой. Как показывает практика, указанное упрощение схемы измерений не влияет на уровни незаглушенного шума.

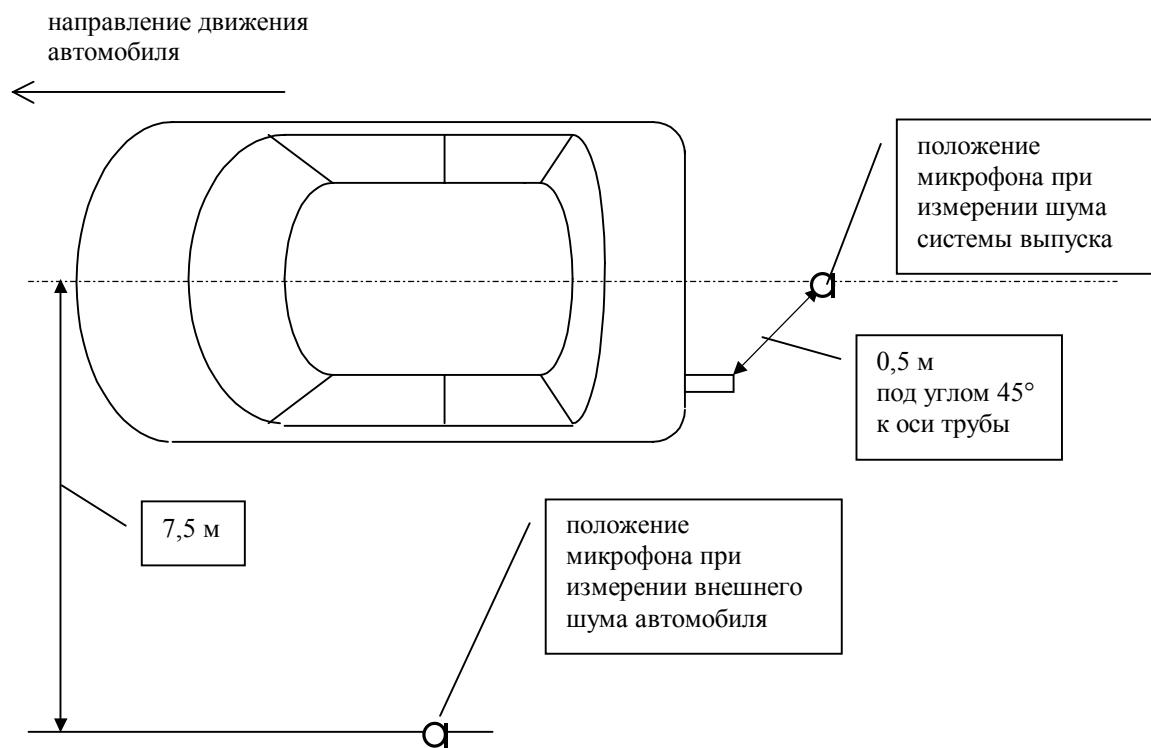


Рис. 1. Схема расположения микрофона при измерении внешнего шума автомобиля и шума системы выпуска

Табл. 1а. Внешний шум, шум выпуска и октавные спектры шума выпуска автомобиля без глушителей

Передача	Внешний шум, дБ(А)	Шум системы выпуска, дБ(А)	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц						
			63	125	250	500	1000	2000	4000
2	110	133	98	110	114	121	129	129	127
3	106	129	90	106	112	117	126	125	125

Табл. 1б. Внешний шум, шум выпуска и октавные спектры шума выпуска автомобиля с глушителями

Передача	Внешний шум, дБ(А)	Шум системы выпуска, дБ(А)	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц						
			63	125	250	500	1000	2000	4000
2	76	90	96	95	88	83	83	81	81
3	72	86	-	-	-	-	-	-	-

Заметим, что уровни внешнего шума автомобиля с выпускной системой без глушителей полностью определяются шумом выпуска. Поэтому, определив в этом случае разницу измеренных уровней выпуска в ближнем поле и внешнего шума автомобиля, получим поправку, позволяющую вычислить по уровням шума выпуска в ближнем поле его вклад во внешний шум автомобиля, оцениваемый по методике Правил ЕЭК ООН. Поскольку выхлопная труба смешена на 0,4 м вправо от продольной оси автомобиля, она располагается на разных расстояниях от точек измерения внешнего шума автомобиля с правой и левой стороны. Поэтому поправки для оценки вклада шума выпуска во внешний шум автомобиля слева и справа получились разными и составили 23 дБ(А) для вклада во внешний шум справа и 24 дБ(А) — для вклада слева. Эта же разница в 1 дБ(А) получается и теоретически, если считать источник шума точечным и использовать следующую формулу:

$$d = 20 \lg [(7,5 + 0,4)/(7,5 - 0,4)].$$

В соответствии с методикой определения вклада шума системы выпуска двигателя во внешний шум автомобиля, разработанной в отделе виброакустики ГНЦ НАМИ и изложенной в РД 37.001.025-85 «Методы акустических и газодинамических испытаний системы выпуска двигателя на автомобиле», система выпуска, имеющая шум на 8–10 дБ(А) ниже чем внешний шум автомобиля, не оказывает влияние на уровень внешнего шума. Таким образом, при уровне внешнего шума автомобиля равного 74 дБ(А) (Правила ЕЭК ООН № 51-02) шум системы выпуска не должен превышать 64–66 дБ(А) в дальнем поле или 88–90 дБ(А) — в ближнем.

РАСЧЕТ ЗАГЛУШЕНИЯ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ДВС НА СТАДИИ ЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование глушителей шума для систем выпуска ДВС является сложной технической задачей, включающей разработку математических описаний колебательных процессов для расчета глушителей и синтеза глушителей и систем при достаточно жестких и противоречивых ограничениях, накладываемых на конструкцию и характеристики систем выпуска газов условиями эксплуатации двигателя. Несмотря на то, что шум, измеренный при разгоне, является главным критерием нормирования, ни в одной из расчетных методик не ставится задача получения частотных характеристик для этих режимов. Основным препятствием для выполнения точного расчета являются: нестационарность и кратковременность режима измерения, нелинейность колебательных процессов, воздействие высокой скорости и температуры газового потока, вторичное шумообразование в глушителе и неопределенность акустического сопротивления двигателя как источника шума. Нестационарность режима измерения проявляется в изменении расстояния от выхлопной трубы до микрофона, направления на источник и изменении частоты работы двигателя. Нелинейность колебательных процессов приводит к искажению переходов между отдельными элементами системы в сравнении с линейными процессами т. к. из-за высокого уровня звукового давления возрастает сопротивление горловин резонаторов, перфорированных решеток и т. п. Вторичное шумообразование зависит от конструкции и может быть тональным и широкополосным.

Старые методы проектирования глушителей и систем сложной структуры разрабатывались применительно к относительно тихоходным двигателям с небольшими скоростями потока и достаточно низкими частотами колебаний. Поэтому они использовали в основном одномерные подходы к описанию акустического поля в системе выпуска. Для проектирования глушителей шумов выпуска газов современных быстроходных двигателей эти методы оказались во многих случаях недостаточными и в связи с повышением частот генерируемого шума, и в связи с

резким ужесточением требований к шуму автомобилей, причем как раз в области повышенных частот, для которых звуковое поле в глушителе нельзя считать одномерным.

Для систем выпуска газов современных ДВС очень актуальной оказалась как раз проблема заглушения шумов, длины волн которых имеют порядок характерных размеров глушителей, т. е. получение высоких заглушений в частотных областях, в которых уже не применимы одномерные приближения и еще не применимы методы геометрической акустики.

Перечисленные выше обстоятельства потребовали разработки новых, более совершенных методов определения акустических характеристик глушителей, обеспечивающих более полное использование потенциальных способностей глушителей и расширение частотного диапазона их эффективной работы. Усовершенствованные методы позволяют также использовать большее число моделей глушителей и помочь в проектировании новых схем глушителей и систем выпуска газов.

В современных расчетах используют метод, при котором элементы системы представляются в виде одномерных пассивных симметричных четырехполюсников.

Для приближения расчетного определения акустических характеристик систем выпуска к натурным условиям в качестве элементов системы выпуска введены активные сопротивления, также введено отношение скорости потока к скорости звука для учета скорости потока.

После усовершенствования расчетной модели было проведено сравнение расчетной и экспериментальной частотных характеристик (рис. 2).

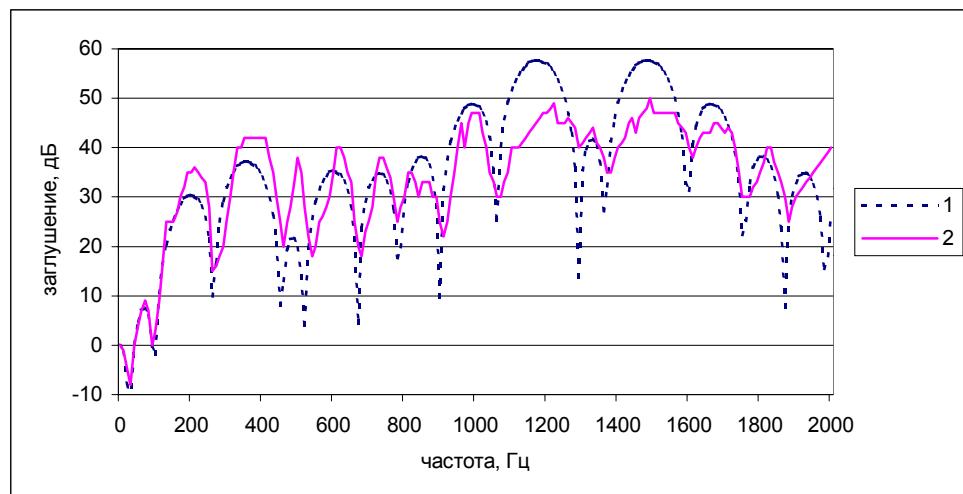


Рис. 2. Расчетная (1) и экспериментальная (2) частотные характеристики заглушения системы выпуска двигателя автомобиля

Приведенный выше метод удовлетворительно описывает поведение системы в линейных условиях, хорошо подтверждается экспериментом на лабораторных установках с низким уровнем звукового давления, кроме того, он обладает большим потенциалом совершенствования с учетом реальных условий.

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ГЛУШИТЕЛЕЙ: ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Система выпуска двигателя современного автомобиля состоит из нейтрализатора, резонатора, основного глушителя, дополнительного глушителя. Каталитический нейтрализатор отработанных газов служит для снижения токсичности выхлопа, однако корпус нейтрализатора также выполняет функции шумозаглашивающего устройства. Например, в системе выпуска автомобиля с двигателем объемом 2,0 литра нейтрализатор снижает шум на 1–2 дБ(А). Кроме того, начинка нейтрализатора сглаживает пульсацию газового потока.

Глушитель является основным шумоподавляющим устройством в системе выпуска двигателя. Если, по конструктивным соображениям, невозможно разместить глушитель нужного размера в нужном месте, то для достижения необходимого заглушения в систему выпуска двигателя включают резонаторы и дополнительные глушители.

По своей конструкции и способу снижения шума выхлопа глушители делятся на реактивные, активные и реактивно-активные.

Конструкции большинства реактивных глушителей для автомобилей российского производства разрабатывались еще в 1970–80-х годах. Применительно к требованиям тех лет, регламентирующими уровень внешнего шума относительно тихоходных и низкооборотных двигателей, и технологическому оборудованию, используемому в то время, эти конструкции были вполне приемлемы. Однако в настоящее время, с развитием технологии, двигателестроения и ужесточением норм на внешний шум автомобиля большинство этих конструкций изжили себя. Ниже приведены их основные недостатки. Эти недостатки, в общем, присущи всем глушителям реактивного типа.

Конструкции этих глушителей выполнены по классической схеме реактивного глушителя: большая расширительная камера разделена на 3 или 4 части перфорированными перегородками, расположенными в пучностях колебательной скорости. Эти четыре перегородки и три перфорированные трубы призваны подавлять некоторые формы колебаний и способствовать поглощению высокочастотного шума. В то же время они значительно повышают массу и металлоемкость глушителя, а при использовании в системе выпуска высокооборотного двигателя с объемом более 1500 см³ и, следовательно, высокими скоростями потока газов, перфорированные перегородки и трубы в ряде случаев сами становятся источниками значительного вторичного шума. Короткая хвостовая труба глушителя образует вместе с его объемом последовательный колебательный контур, собственная частота которого оказывается в зоне частот рабочего процесса двигателя и таким образом увеличивает шум выпуска. Для уменьшения звучания трубы на резонансных частотах в системе выпуска двигателя применяют два небольших дополнительных глушителя, присоединенные к трубе в зоне максимума звукового давления. Таким образом, для улучшения акустических свойств реактивного глушителя необходимо применять дополнительные устройства, которые повышают металлоемкость и массу всей системы выпуска.

Конструкции дополнительных глушителей системы выпуска двигателя обычно выполнены по классической схеме концентрического резонатора, настроенного на определенную частоту и не влияющего на другие частоты. Кроме того, внутри него часто располагают дроссель, который подавляет одну или несколько форм собственных колебаний газа в трубе. Однако дроссель уменьшает проходное сечение трубы и тем создает повышенное противодавление, а значит, снижает мощность двигателя. Кроме того, заглушение, вносимое дросселем, зависит от скорости потока газа. Поэтому, если одна из собственных форм полностью подавляется

дросселем, например, на режиме 0,75 номинальной мощности двигателя, то она может активно звучать, когда скорость газа мала. Основным элементом автомобильных глушителей реактивного типа уже много лет остается расширительная камера. Этому способствуют ее простота и эффективность, причем эффективность расширительных камер мало меняется под воздействием потока газов. Но часто, особенно на высоких частотах этой эффективности не хватает. Для расширения области акустической эффективности расширительных камер в них стали закладывать звукопоглощающие материалы, например, базальтовое жаростойкое (до 500°C) волокно. Так появились реактивно-активные глушители. Этот тип глушителей является в настоящее время наиболее распространенным в мировом автомобилестроении, благодаря высокой акустической эффективности в широком диапазоне частот.

В отличие от реактивных глушителей, активные и реактивно-активные глушители имеют камеры, заполненные звукопоглощающим материалом. Ниже описаны некоторые виды таких материалов и отмечены их достоинства и недостатки.

Материалы с тонким волокном (2 мкм) имеют высокий коэффициент звукопоглощения ($\text{КЗП}=0,7\text{--}0,9$) в диапазоне высоких частот (1–2 кГц) даже при малой толщине образца (20–30 мм). При увеличении толщины образца КЗП материала возрастает на всех частотах. Длина волокна на КЗП материала влияния практически не оказывает. Прошивной материал имеет более высокий КЗП на средних (250–800 Гц) частотах и более низкий на высоких (800–2000 Гц) (рис. 3).

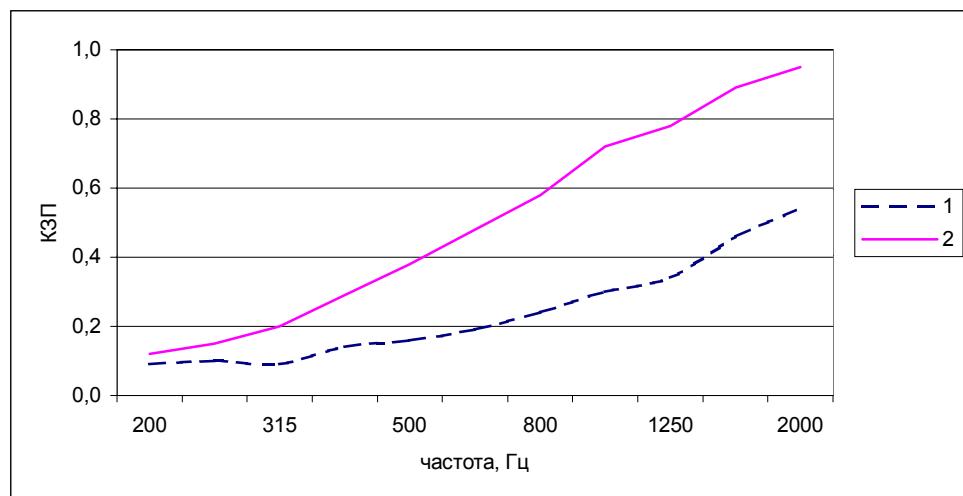


Рис. 3. Изменение частотной характеристики коэффициента звукопоглощения материала при различной толщине волокна образца

Материал: базальтовое волокно, толщина образца 30мм

1 — толщина волокна 9мкм, 2 — толщина волокна 2мкм

Материалы с толстым волокном (9–12 мкм) при малой толщине образца (20–30 мм) имеют низкий КЗП (не более 0,3) на частоте 1 кГц. С увеличением толщины образца до 50 мм и больше, КЗП материала увеличивается. Особенно это увеличение заметно на высоких частотах (рис. 4).

Прошитые материалы имеют фиксированную плотность. Непрошитые материалы позволяют изменять свою плотность. При увеличении плотности материала его КЗП увеличивается в области средних частот (250–800 Гц) и снижается в области высоких частот (800–2000 Гц). При уменьшении плотности материала его КЗП, напротив, повышается на высоких

частотах и уменьшается на средних. Плотность, равная $100 \text{ кг}/\text{м}^3$, для минераловатных материалов признана, по результатам испытаний, оптимальной.

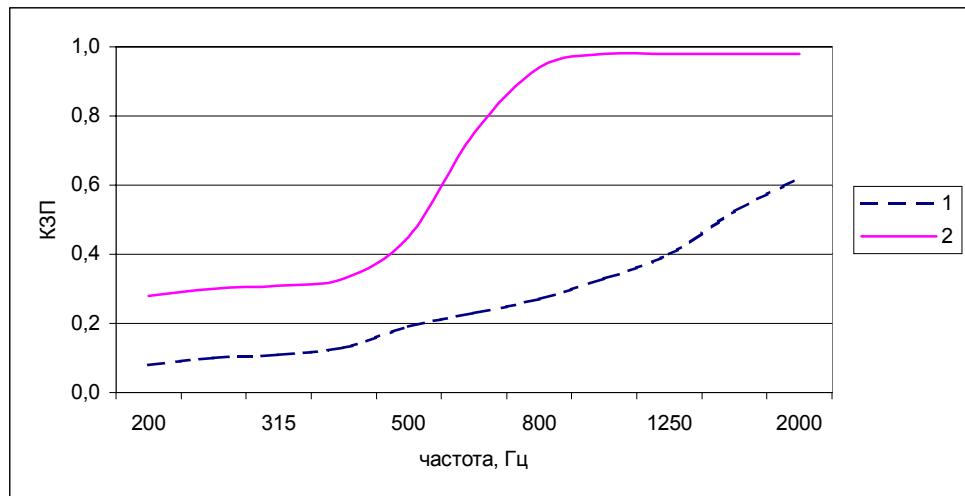


Рис. 4. Изменение частотной характеристики коэффициента звукопоглощения материала при различной толщине

*Материал: базальтовое волокно, толщина волокна 9 мкм
1 — толщина образца 20мм, 2 — толщина образца 50мм*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описанная в статье методика расчетно-экспериментальных исследований систем выпуска автомобильных двигателей позволяет всесторонне оценить техническое совершенство системы выпуска, связанное со снижением внешнего шума автомобиля.

2. Разработанная программа по расчету акустических характеристик систем выпуска двигателей, как показали эксперименты, позволяет уже на стадии проектирования оценивать акустические свойства глушителя с точностью до 3 дБ.

3. Экспериментальная методика позволяет оценить вклад шума системы выпуска двигателя во внешний шум автомобиля, даже если шум системы выпуска ниже шума от других источников.

4. Методика апробирована в научно-исследовательской работе по созданию системы выпуска двигателя для автомобиля «Москвич 2142» с двумя типами двигателей. Автомобиль с предложенной системой выпуска двигателя имеет внешний шум 74 дБ(А), что соответствует действующим ныне международным стандартам (Правила ЕЭК ООН № 51-02).

С помощью разработанной методики был доведен опытный глушитель, имеющий улучшенные акустические характеристики. В глушителе были использованы волокнистые звукопоглощающие материалы. Подбор материалов осуществлялся с учетом представленных в данной статье особенностей акустических характеристик. При разработке конструкции глушителя были учтены недостатки классических конструкций глушителей, приведенные в данной статье.

5. На основе предложенной методики в настоящее время разрабатывается отраслевой руководящий документ. Данная методика будет рекомендована к применению на предприятиях по производству автомобильных глушителей.