На правах рукописи

РАХМАТОВ Рахматджон Исломович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПО ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Галевко Владимир Владимирович

Официальные оппоненты: **Васильев Андрей Витальевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Химическая технология и промышленная экология»

Комкин Александр Иванович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»**

Защита состоится «11» апреля 2018 г. в 14-00 ч. на заседании диссертационного совета Д217.014.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, Автомоторная ул., д. 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте www.nami.ru по ссылке: http://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенный печатью организации, просим направлять в адрес диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Автореферат разослан «08» февраля 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. В большинстве крупных городов, таких как Нью-Йорк, Токио, Берлин, Париж, Москва и Санкт-Петербург с каждым годом наблюдается увеличение парка автомобилей, что приводит к увеличению уровня шума, в результате чего происходит акустическое загрязнение среды обитания человека, и как следствие ухудшение здоровья и снижение производительности труда. Например, в крупных городах России уровень шума городского транспорта составляет около 86 дБА, при санитарной норме 75 дБА.

Автотранспортные средства (АТС) вследствие излучения ими при работе шума нарушают экологическое равновесие окружающей среды. Данное обстоятельство заставило мировое сообщество принять законодательные нормы на ограничение уровней шума автотранспортных средств - правила ЕЭК ООН №51 (серия 02). В России в настоящее время действует ГОСТ Р 41.51-2004 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автотранспортных средств, имеющих не менее четырёх колёс, в связи с производимым ими шумом» и ГОСТ Р 53838-2010 «Двигатели автомобильные. Допустимые уровни шума и методы измерения». Законодательное нормирование шума современных автотранспортных средств заставляет совершенствовать и разрабатывать более эффективные методы снижения шума и проектирования малошумных конструкций двигателя внутреннего сгорания (ДВС), агрегатов автомобиля и систем обработки отработавших газов (СООГ).

Степень разработанности темы исследования. В России исследованию шума автотранспортных средств и ДВС посвящены работы И.В. Алексеева, Л.А. Борисова, Н.Ф. Бочарова, А.В. Васильева, В.В. Галевко, Ю.В. Галевко, В.А. Гергерта, М.Н. Дробаха, П.В. Енина, А.Г. Зубакина, Н.И. Иванова, А.И. Комкина, Г.В. Латышева, В.Н. Луканина, Н.А. Никифорова, Н.И. Назарова, Б.И. Осипова, Р.Н. Старобинского, В.А. Стерементарева, В.Е. Тольского, М.И. Фесины, М.Г. Шатрова. Большой объем исследований был выполнен за рубежом (Anderton D., Dixon J., Chan C.M., Andrews S., Davies P.O., Harrison M.F., Desmons L., Kergomard J., Griffiths W.J., Grover E., Hempel W., Priede T., Thien G., Song B.H., Steidle R. Muehleisen R.T., Peat K.S. и др.). Анализ результатов научных исследований показал, что при проектировании и исследовании системы обработки отработавших газов целесообразно использовать активные методы снижения шума, позволяющие расчетно-экспериментальным способом получить конструктивные решения, направленные на снижение структурного шума и от среза концевой трубы, при обеспечении требований по токсичности и противодавлению.

Целью диссертационной работы является разработка расчетно-экспериментальных методов исследования и определения виброакустических характеристик отдельных элементов СООГ, необходимых для проектирования системы в целом, а также разработка метода поиска конструктивных решений по снижению акустического излучения от наружных поверхностей СООГ на примере глушителя-нейтрализатора.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **основные задачи исследования:**

- разработать методику моделирования СООГ на основе полученных расчетно-экспериментальным способом акустических характеристик элементов системы выпуска автотранспортного средства;

- разработать методики и стенды для проведения расчетно-экспериментальных исследований акустических характеристик элементов СООГ: каталитические блоки, резонаторные и объемные камеры;

- разработать вариант конструкции глушителя-нейтрализатора на основе разработанной методики и оценить в составе автотранспортного средства разработанную конструкцию СООГ в сравнении с серийным глушителем в соответствии с ГОСТ 41.51-2004;

- определить граничные условия и выполнить расчеты вынужденных частот и форм колебаний глушителя-нейтрализатора с целью разработки конструктивных решений по снижению звукового излучения от наружных поверхностей.

Научная новизна:

- разработана и реализована методика моделирования СООГ автотранспортных средств на основании акустических характеристик элементов СООГ, полученных расчетно-экспериментальными способами;

- разработаны расчетно-экспериментальные методики и стенды для определения акустических характеристик элементов СООГ АТС, необходимых для моделирования системы в целом;

- расчетно-экспериментальным способом разработана, изготовлена и испытана конструкция глушителя-нейтрализатора, позволяющая снизить акустическое излучение АТС;

- эффективность разработанной методики проектирования СООГ подтверждена по результатам сравнительных испытаний в соответствии с ГОСТ 41.51-2004;

- с целью уменьшения шума от наружной поверхности глушителя-нейтрализатора АТС рассчитаны с учетом граничных условий частоты и формы колебаний отдельных наружных поверхностей при введении различных конструктивных изменений и выбраны наиболее эффективные решения по критерию - уменьшение среднего значения квадрата виброскорости по отдельной поверхности конструкции.

Практическая ценность:

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научно-исследовательских, научно-образовательных учреждениях и производственных предприятиях, специализирующихся на разработке и производстве систем обработки отработавших газов для автотранспортных средств (АТС), с целью достижения перспективных экологических норм по шуму. Методика исследования частот и форм колебаний отдельных поверхностей при введении различных конструктивных изменений с целью снижения шума может быть использована при разработке мероприятий по сни-

жению шума, например, от ненагруженных деталей ДВС (клапанные крышки, поддон, крышка ГРМ, картер сцепления и др.), от отдельных кузовных поверхностей, от наружных поверхностей коробок передач, редукторов и других агрегатов транспортных средств.

Объекты исследования:

Системы обработки отработавших газов грузового автомобиля. Элементы СООГ. Опытные образцы СООГ.

Предметом исследования являлись - усовершенствованный метод проектирования СООГ на основе полученных расчетно-экспериментальным способом акустических характеристик элементов системы, методики и экспериментальное оборудование для определения и исследования акустических характеристик элементов СООГ, методика определения конструктивных решений по снижению шума от наружных поверхностей СООГ и ее реализация для глушителя-нейтрализатора.

На защиту выносятся:

- результаты анализа исследований основных источников шума современных автомобилей, анализ нормативно-правовых актов, регламентирующих акустическое излучение АТС;
- методика конечно-элементного моделирования СООГ АТС на основе полученных расчетно-экспериментальным способом акустических характеристик элементов СООГ;
- разработанный стенд и методика проведения и обработки результатов экспериментальных исследований акустических характеристик элементов СООГ: каталитические блоки, резонаторные и объемные камеры;
- результаты расчетно-экспериментальных исследований акустических характеристик элементов СООГ: каталитические блоки, резонаторные и объемные камеры;
- разработанный вариант конструкции глушителя-нейтрализатора для грузового автомобиля, удовлетворяющий современным требованиям с учетом габаритно-компоновочных ограничений, на основании результатов расчетно-экспериментальных исследований элементов СООГ, полученных в диссертационной работе;
- результаты экспериментальных исследований акустических характеристик разработанной конструкции глушителя-нейтрализатора;
- методика и результаты определения частот и форм колебаний элементов и СООГ в целом, с учетом граничных условий, для разработки конструктивных решений по снижению звукового излучения от наружной поверхности глушителя-нейтрализатора;
- конструктивные решения по снижению звукового излучения от поверхности глушителя-нейтрализатора силовой установки АТС.

Достоверность результатов исследований основывается на использовании современной измерительной аппаратуры, имеющей международный сертификат соответствия. Достоверность результатов, полученных по разработанной методике оцени-

валась путем сравнения результатов расчетных исследований с результатами экспериментальных исследований.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно проведены библиографические, расчетные и расчетно-экспериментальные исследования элементов СООГ и системы в целом, экспериментальные исследования по внешнему шуму и определению граничных условий для расчетно-экспериментального определения конструктивных решений по снижению звукового излучения от наружных поверхностей. Разработаны специальные установки для определения акустических характеристик элементов СООГ и расчетные программы: для обработки экспериментальных данных, нахождения коэффициентов матрицы передач и нахождения акустических параметров.

Апробация работы. Основные положения диссертации представлены, обсуждены и одобрены на пятом международном экологическом конгрессе (седьмая международная научно-техническая конференция) "ELPIT-2015”, Международной Инновационно-ориентированной Конференции Молодых Учёных и Студентов "МИКМУС-2014", 72-75 научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, II международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин 2014» СГАУ (г. Самара, 15-17 сентября 2014г.), на II Международной заочной научно-практической конференции "Современные проблемы теории машин", СибГИУ (3-4 июня 2014 г.). Материалы диссертации включены в научный отчет о научно-исследовательской работе «Расчетно-экспериментальные исследования элементов систем обработки отработавших газов (СООГ), удовлетворяющих современным требованиям по шумоглушению и противодавлению», выполненной в рамках программы стратегического развития МАДИ в 2014 году.

Публикации. По материалам проведенных исследований опубликовано 8 статей, 5 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в сборниках международных научных конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений; содержит 120 страницы без приложений, 97 рисунков, 5 таблиц и библиографического списка из 92 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, определены цели, задачи, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен анализ: влияния автотранспортных средств на акустическое загрязнения окружающей среды; влияния основных источников шума автотранспортных средств на общий шум и классификация их по значимости; современных нормативно-правовых актов, регламентирующих акустическое излучение автотранспортных средств; современных методов снижения шума и тенденций развития СООГ.

Во второй главе представлена методика исследования акустических характеристик элементов СООГ, необходимого для проектирования системы в целом; разработаны стенды, методики проведения экспериментальных исследований, программы для обработки экспериментальных данных необходимых для исследования элементов СООГ; определены параметры акустической нагрузки стенда для проведения акустических испытаний элементов системы.

Всю систему обработки отработавших газов можно разбить на ряд отдельных известных акустических элементов, определенным образом связанных между собой. В результате теоретических исследований для каждого из этого ограниченного ряда элементов выведена математическая формула, описывающая его акустические характеристики. Взаимодействие каждого этого элемента с соседним в СООГ задается через входное и выходное сопротивление Z (акустический импеданс), которое определяется звуковым давлением P и колебательной скоростью частиц среды V (1). Связь этих параметров для каждого элемента определяет таблица (матрица передачи) T, которая полностью характеризует акустическое поведение элемента. В матричном виде это соотношение можно записать:

$$Z_{in} = T \cdot Z_{out};\ Z_{in} = \begin{bmatrix} P_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix};\ Z_{out} = \begin{bmatrix} P_{out} \\ V_{out} \end{bmatrix};\ T = \begin{bmatrix} T_{11} T_{12} \\ T_{21} T_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где Z-акустический импеданс, P-звуковое давление, V-колебательная скоростью частиц среды, T-матрица передач.

Для точного моделирования акустического поведения любого по сложности элемента СООГ и исследовать влияние геометрических параметров СООГ и таких свойств газовой среды, как плотность, температура и скорость потока, на ее акустические параметры был использован метод конечно-элементного моделирования (КЭМ).

Для проверки точности вычислений с применением конечно-элементной модели необходимо провести стендовые испытания элементов СООГ, для которых проводились расчеты. В стендовых условиях определяется параметр потери передачи *TL* в рабочем диапазоне частот, который затем сравнивается с расчетными значениями. Экспериментальный метод определения *TL* основан на измерении звукового давления в нескольких точках на входе и на выходе исследуемого элемента СООГ, расчетном разделении падающей и отраженной волны, последующем расчетном нахождении

мощности звуковых волн на входе $W_{вх}$ и выходе $W_{вых}$ элемента СООГ (Рисунок 1) и определении TL по формуле:

$$TL = 10 \cdot \lg (W_{вх} / W_{вых})$$

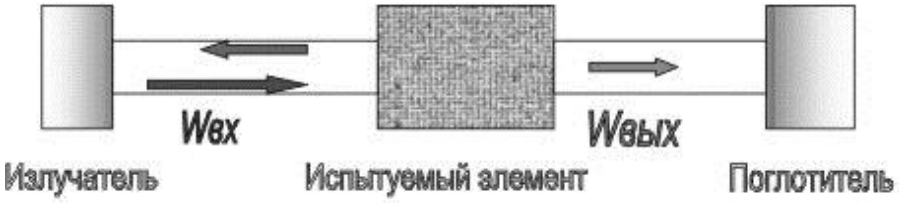


Рисунок 1. Схема исследования элементов СООГ

Испытуемый элемент СООГ размещается между источником звуковых волн на одном конце трубы и звукопоглощающей конструкцией на другом конце трубы. Между акустическим излучателем и испытуемым образцом устанавливается входной измерительный блок микрофонов, а между испытуемым образцом и звукопоглотителем - выходной измерительный блок микрофонов.

Спектры звуковых давлений и колебательных скоростей по обеим сторонам элемента СООГ связаны между собой матричным уравнением:

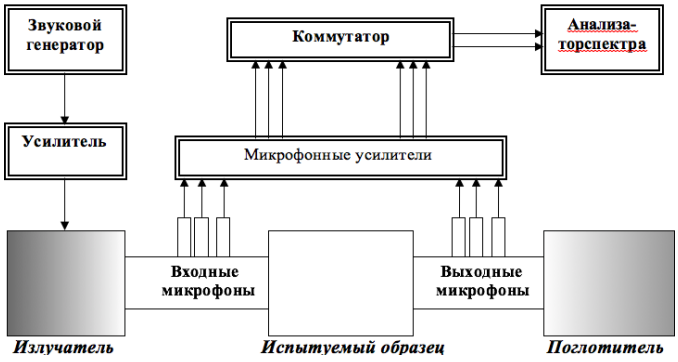
$$\begin{bmatrix} P_u \\ V_u \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_d \\ V_d \end{bmatrix}_{x=d} \qquad (2)$$

где T - матрица передачи исследуемого глушителя.

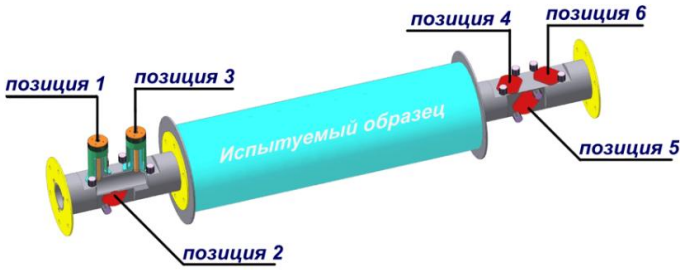
Параметр потери передачи TL определяется из следующего выражения:

$$TL = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{2} \cdot \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{W_0} + W_0 \cdot T_{21} + T_{22} \right| \right) \qquad (3)$$

Принципиальная и конструктивная схема стенда приведены на рисунках 2а и 2б соответственно. Стенд представляет собой пять последовательно соединенных блоков, средний из которых является испытуемым элементом СООГ.



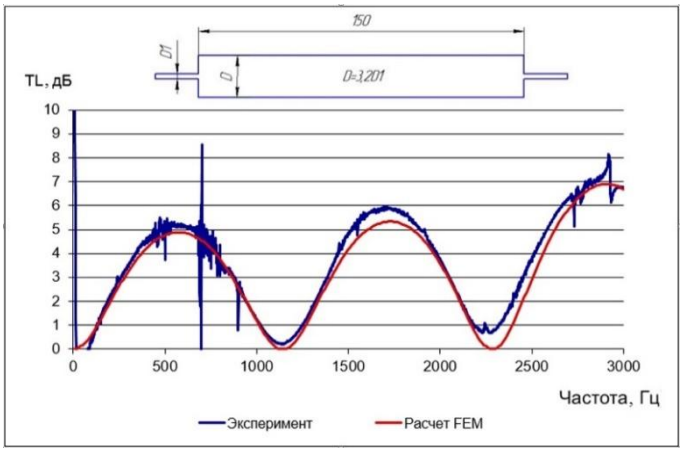
а



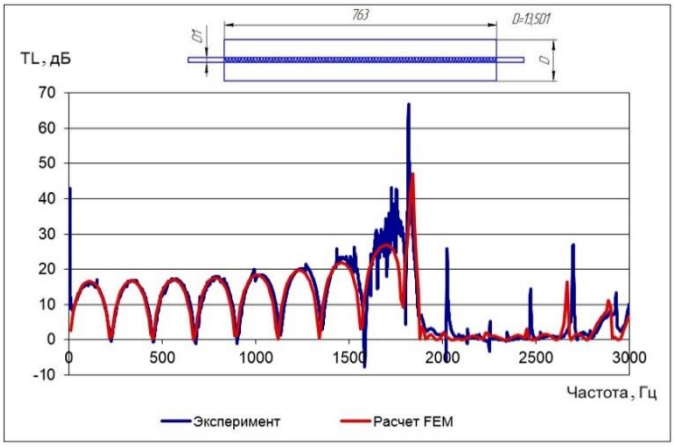
б

Рисунок 2 - Схема стенда: а-принципиальная и б-конструктивная

К входу и выходу испытуемого образца через переходные фланцы с прокладками крепятся, соответственно, входной и выходной микрофонные измерительные блоки, которые также через переходные фланцы с прокладками соединены с акустическим излучателем на входе и акустическим поглотителем на выходе. Искомый параметр TL определяется по результатам измерений с помощью расчетов, в которые входит скорость звука в воздухе и плотность воздуха. Были выполнены эксперименты и расчеты для основных элементов СООГ, являющихся составными частями любых СООГ (расширительная и резонансная камера). На рисунке 3 приведены результаты: а - цилиндрической расширительной камеры длиной 150 мм и степенью расширения 3,2 и б - цилиндрической резонансной камеры длиной 763 мм и степенью расширения 13,5 с центральной перфорированной трубой.



а

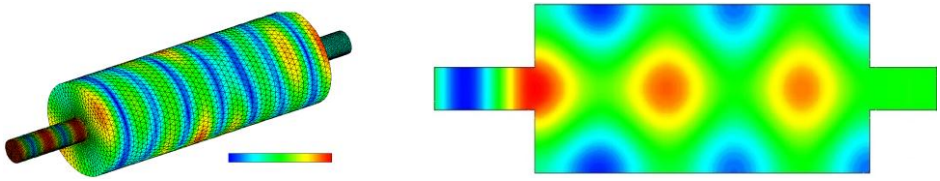


б

Рисунок 3. Результаты расчетно-экспериментальных исследований: а - расширительная камера; б - резонансная камера

Как видно из приведенных данных, результаты расчета имеют очень хорошее совпадение с результатами экспериментов. Некоторое "размытие" экспериментальных результатов, особенно при больших значениях поглощения (более 30 дБ) объясняются слабым акустическим сигналом на выходе элемента СООГ, то есть низким соотношением сигнал/шум и, соответственно, слабой корреляцией между входными и выходными сигналами при измерении на стенде. Резкое уменьшение эффективности работы камер со степенью расширения 13,5 на частотах выше 1900 Гц объясняется появлением на этих частотах поперечных форм колебаний объема камер, в то время как на более низких частотах обеспечивается условие плоской волны и присутствуют только продольные колебания.

Расчеты с использованием КЭМ дают возможность не только рассчитать потери передачи и другие параметры элемента СООГ, но и определить пространственную форму колебаний воздушного объема, то есть распределение звукового давления по объему на любой частоте (Рисунок 4).



а *б*

Рисунок 4. Распределения звукового давления по поверхности (а) по сечению (б) резонансной камеры

С введением в действие все более жестких норм по токсичности отработавших газов обязательным элементом СООГ становится блок каталитического нейтрализатора. Компании «Corning», «Engelhard» (США), «Siemens», «Degussa», «BASF» (Германия), «NGK» (Япония), «Haldor Topsoe» (Дания) производят каталитические блоки, которые удовлетворяют данные требования. Подбор каталитических блоков, проводится согласно методикам разработанными этими производителями, которые учитывают параметры ДВС автотранспортного средства, такие как токсичность и противодавление. Также учитываются габаритно-компоновочные особенности автотранспортного средства по расположению каталитических блоков, устанавливаемый или как отдельный элемент в металлическом корпусе, или в одном корпусе с глушителем. Для точного расчета СООГ необходимо знание акустических параметров блока, который кроме выполнения своих основных функций является также достаточно эффективным элементом шумоглушения. Блок нейтрализатора устанавливается в СООГ таким образом, чтобы весь газовый поток проходил через его ячейки, который с точки зрения акустики представляют собой параллельный набор прямых капиллярных волноводов. Весь объем блока нейтрализатора, через который проходит звуковая волна, представляется однородной средой с некоторыми присущими ей волновыми параметрами. Звуковая волна, проходящая через нейтрализатор, претерпевает изменения по амплитуде и фазе аналогично любой среде, например, однородному базальтовому волокну. По измеренным характеристикам волны до и после нейтрализатора можно определить любые его усредненные по объему волновые параметры: скорость звука, волновое число, объемный импеданс и т.д. Эти параметры можно применять при расчетах, считая их принадлежащими однородной среде в объеме, занимаемом блоком.

Экспериментальное определение параметров каталитического блока, используемого в производстве СООГ, проводилось с использованием метода четырех микрофонов (Рисунок 5). Образец материала толщины d установлен в трубе между двумя парами микрофонов. На одном конце трубы размещается динамик S, генерирующий в трубе звуковые волны, а на другом конце − нагрузка L.

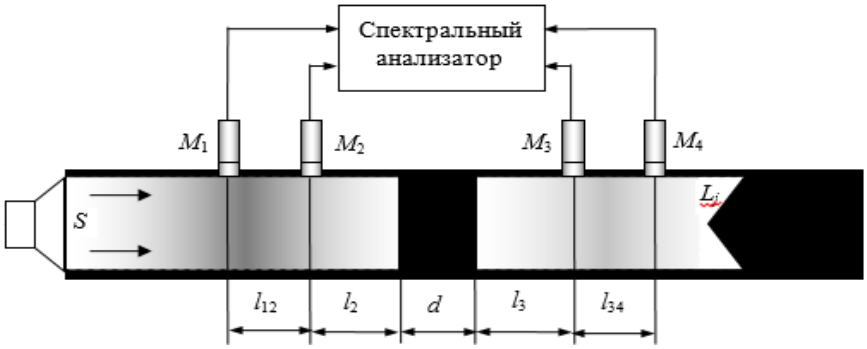


Рисунок 5. Схема стенда для определения акустических параметров каталитических блоков

Измерения и определение коэффициентов матрицы передачи образца каталитического блока проводилось по методике, описанной выше. Отличие заключается в том, что для такой симметричной системы, как каталитический блок «звукопоглощающий материал (ЗПМ)», имеют место следующие соотношения между коэффициентами матрицы передач:

$$T_{11} = T_{22}; \quad T_{11} \cdot T_{22} - T_{12} \cdot T_{21} = 1 \tag{4}$$

С учетом этих соотношений коэффициенты могут быть определены по результатам измерений только с одной нагрузкой по формулам:

$$T_{11} = T_{22} = \frac{P_d \cdot V_d + P_u \cdot V_u}{P_d \cdot V_u + P_u \cdot V_d}; \; T_{12} = \frac{P_u^2 - P_d^2}{P_d \cdot V_u + P_u \cdot V_d}; \; T_{12} = \frac{V_u^2 - V_d^2}{P_d \cdot V_u + P_u \cdot V_d} \tag{5}$$

С другой стороны, для образца ЗПМ коэффициенты матрицы передачи имеют вид:

$$\begin{bmatrix} T_{11} T_{12} \\ T_{21} T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kd & \left(\frac{j}{W}\right) \cdot \sin kd \\ (j \cdot W) \cdot \sin kd & \cos kd \end{bmatrix} \tag{6}$$

где k, W —постоянная распространения и волновое сопротивление

Отсюда находим искомые акустические характеристики каталитического блока:

$$W = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}}; \qquad k = \frac{1}{d} \cdot arcsin \sqrt{-T_{12} \cdot T_{21}} \tag{7}$$

В результате измерений определялся не только параметр потери передачи, но и коэффициенты матрицы передачи (5), по которым рассчитывается усредненные объемные параметры нейтрализатора - волновое число и волновое сопротивление.

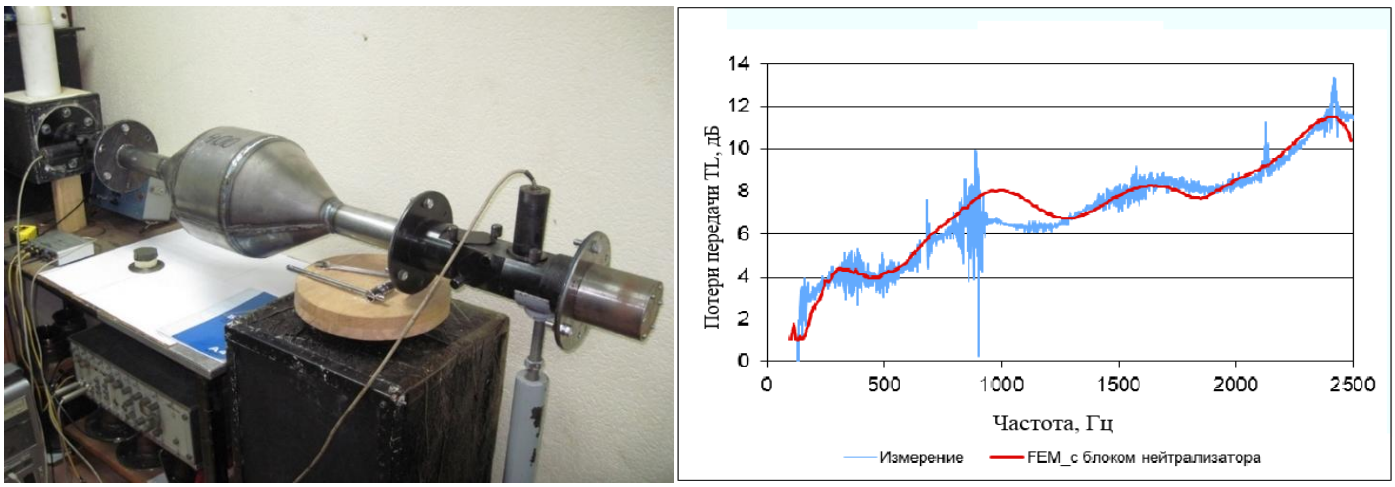
Упакованный в корпус блок нейтрализатора занимает только центральную часть объема. Перед ним на входе имеется расширительный конус, а за ним на выходе - сужающийся конус. Таким образом, мы определили параметры матрицы передачи *TT* для акустической системы входной конус (матрица передачи T_{in}) - блок нейтрализатора (матрица передачи *T*) - выходной конус (матрица передачи T_{out}). Для нахождения искомой матрицы передачи для блока нейтрализатора T необходимо решить матричное уравнение:

$$TT = T_{in} \cdot T \cdot T_{out} \quad (8)$$

где, TT-параметр матрицы передач, T, T_{in} и T_{out} - матрица передач элементов системы.

Для получения искомых значений T (6) необходимо найти величины T_{in} и T_{out}. Эта задача была решена с помощью метода конечных элементов (построены математические модели для входного и выходного конуса, по которым были рассчитаны коэффициенты матриц передач T_{in} и T_{out}). Кроме того, для определения параметров потери передачи TL и коэффициентов матрицы передачи были определены коэффициенты акустических нагрузок стенда экспериментальным способом.

Для проведения эксперимента был выбран каталитический блок, который предназначен для СООГ АТС. Изготовленный в стендовом варианте исполнения каталитический блок был испытан на акустическом стенде по разработанной методике (Рисунок 6а). Результаты расчетов с заданием параметров скорость звука и плотности по результатам испытаний, а также экспериментально полученные результаты стендовых испытаний приведены на рисунке 6б и показывают высокую степень точности математической модели.

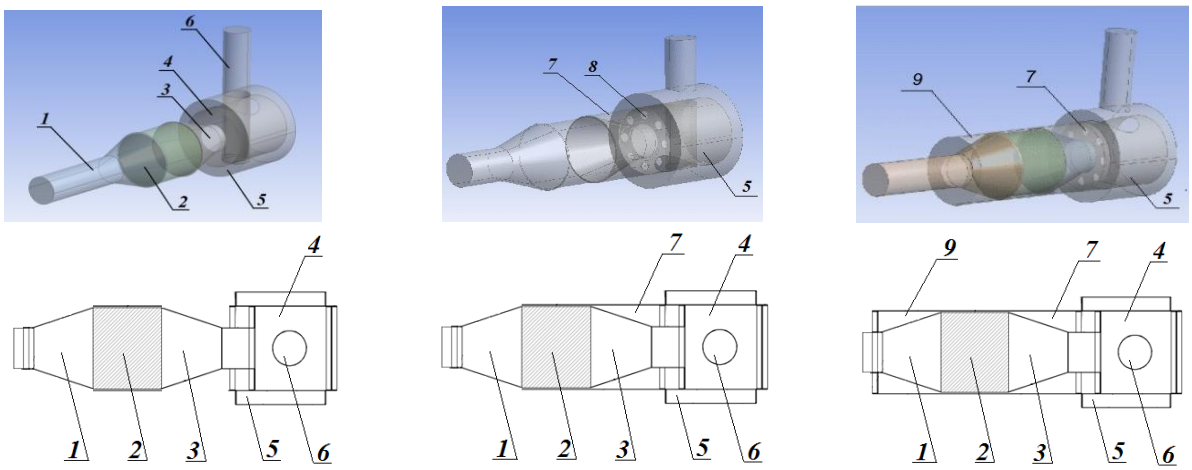


а *б*

Рисунок 6. Упакованный каталитический блок на стенде (а) и его спектр потери передачи TL (б)

<u>Во третьей главе</u> представлена методика проектирования конструкции СООГ. Проведены экспериментальные исследования разработанной конструкции СООГ по внешнему шуму на АТС.

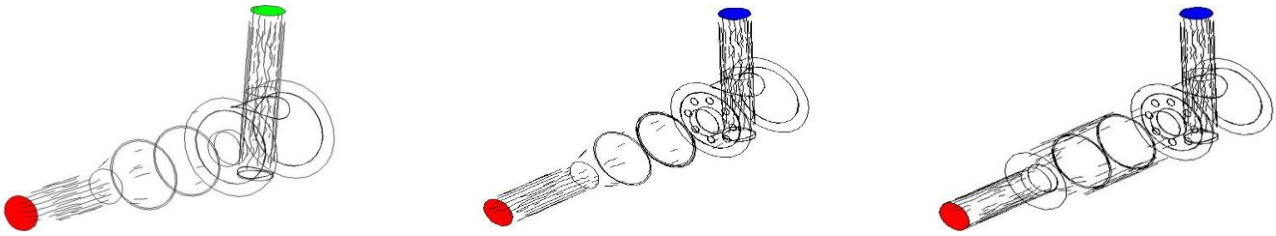
Исходя из габаритно-компоновочных ограничений были выбраны из множества вариантов, три конструкции СООГ (Рисунок 7).



а *б* *в*

Рисунок 7. Конструкции СООГ: а - с двумя объемными камерами, б - с тремя объёмными камерами и в - с 4-мя объемными камерами

Для последующего расчета задавались граничные условия: на входе - поршневое возбуждение, на выходе - согласованная нагрузка. На приведенном рисунке 8а отмечены красным и зеленым цветам, а на рисунках 8б и 8в отмечены соответственно красным и синим цветом.



а *б* *в*

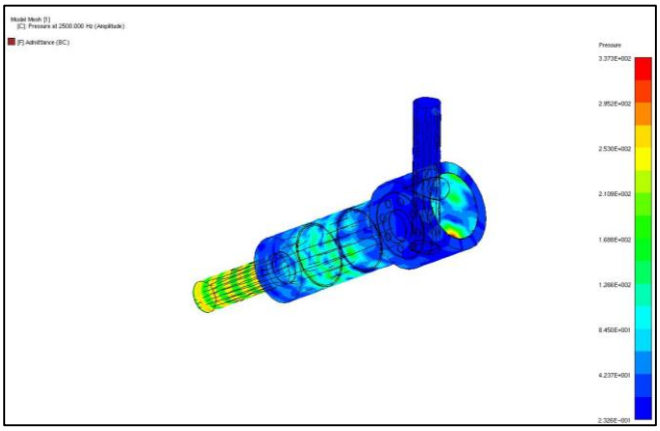
Рисунок 8. Граничные условия конструкции СООГ: а - с двумя объемными камерами, б - с тремя объемными камерами и в - с 4-мя объемными камерами

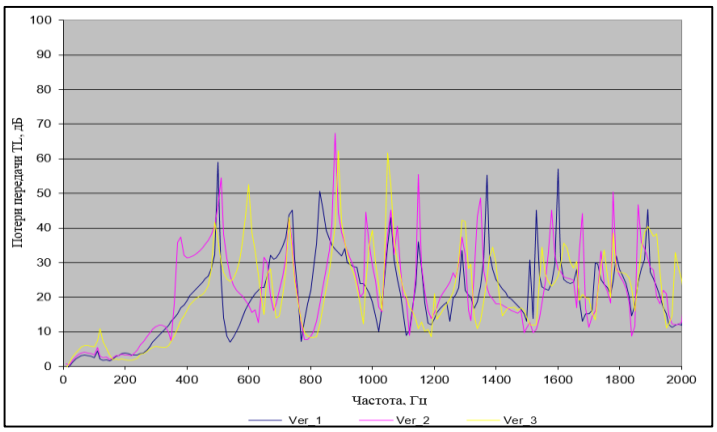
Отметим, что параметры плотности и скорости распространения звука в каталитическом блоке были определены расчетно-экспериментальным способом по разработанной методике и использованы для проектирования и расчета 3-х конструкции СООГ (Рисунок 9).

а *б*

Рисунок 9. Граничные условия каталитического блока для конструкции СООГ: а - с двумя объемными камерами и б - с 3-я объемными камерами

Распределение звукового давления по объему глушителя-нейтрализатора на частоте 2500 Гц представлен на рисунке 10а и параметр потери передачи TL трех конструкций СООГ представлены на рисунке 10б в следующим порядке: Ver_1- первая конструкция (Рисунок 7а); Ver_2- вторая конструкция (Рисунок 7б); Ver_3- третья конструкция (Рисунок 7в).





а *б*

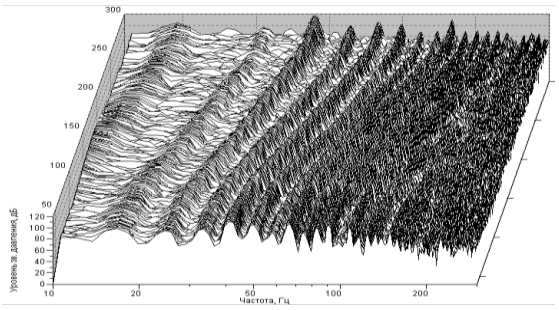
Рисунок 10. Распределение звукового давления по объему глушителя-нейтрализатора третей конструкции на частоте 2500 Гц (а) и спектр потери передачи TL всех 3-х конструкций (б)

Как можно видеть из приведенных результатов, в средне- и высокочастотном диапазоне все конструкции имеют примерно одинаковую среднюю эффективность 20 - 40 дБ, которая достаточна для эффективной работы СООГ. Эффективность снижения звукового давления на частотах до 150 Гц обеспечивает третья конструкция глушителя-нейтрализатора (Рисунок 7в), которая была изготовлена (Рисунок 11) и ее эффективность была оценена на грузовом автомобиле.

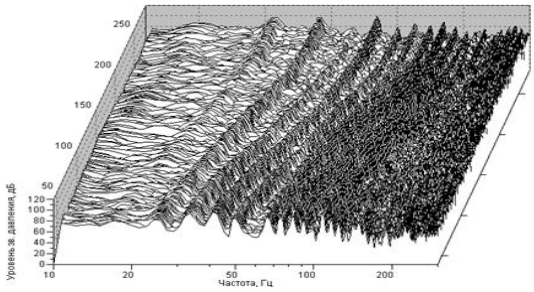
а *б*

Рисунок 11. Изготовленная конструкция СООГ (а) в разрезе (б)

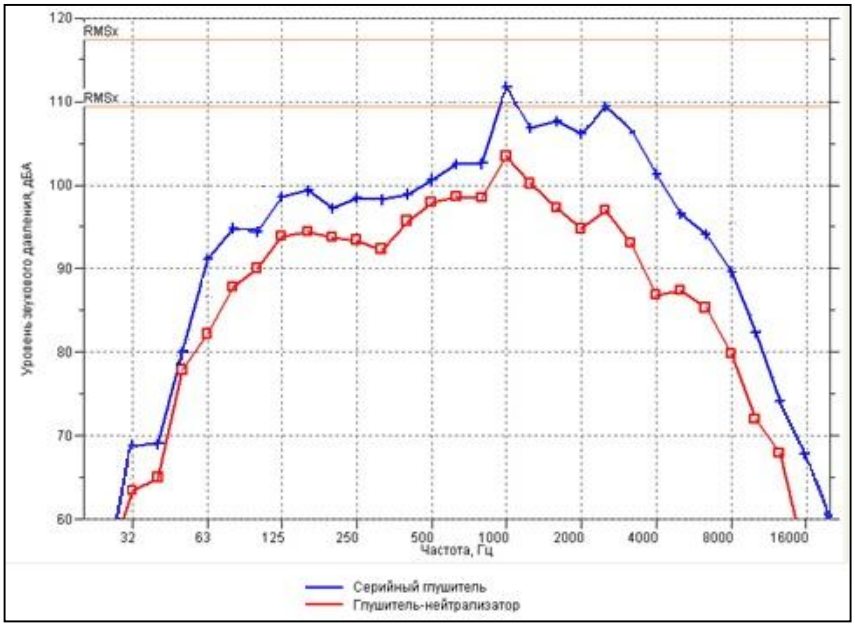
Испытания в сравнении с серийным глушителем проводились на неподвижном автомобиле в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 41.51-2004 на полигоне ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Точка измерения звукового давления располагалась на расстоянии 0,5 метра от среза выхлопной трубы под углом 45 градусов. Результаты сравнительных измерений приведены на рисунке 12.



а



б



в

Рисунок 12. Сонограммы звуковых давлений на срезе выпускной трубы серийного глушителя (а) и глушителя-нейтрализатора (б), в - спектр звукового давления на срезе серийного глушителя и глушителя-нейтрализатора

Из рисунка 12 следует, что на всех скоростных режимах работы двигателя в низкочастотной области до 150 Гц, спектральные составляющие при установке глушителя нейтрализатора значительно ниже, чем при серийном глушителе. Максимальное значение звукового давления на частоте 1000 Гц составило у серийного глушителя 113 дБ, а у глушителя-нейтрализатора 104 дБ, что на 9 дБ меньше. В низкочастотной области уровни звукового давления у глушителя-нейтрализатора на 2-11 дБ ниже, чем у серийного глушителя. В средне- и высокочастотном диапазоне снижение звукового давления у глушителя-нейтрализатора составляет 9 - 20 дБ. При необходимости эффективность в средне- и высокочастотном диапазонах эффективность снижения звукового давления можно повысить введением диссипативного элемента.

Также были проведены сравнительные испытания при движении АТС в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 41.51-2004 на полигоне ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Режим движения - разгон на 5-ой низшей передаче на мерном участке длиной 20 м от начальной скорости, соответствующей частоты вращения коленчатого вала двигателя 950 мин$^{-1}$. Микрофон устанавливался на расстоянии 7,5 м от продольной оси автомобиля и на высоте 1,2 м от уровня дороги (Рисунок 13).

Рисунок 13. Испытания СООГ на полигоне НАМИ

На рисунке 14 показаны спектры внешнего шума с левой стороны автомобиля КАМАЗ-5460-63, замеренные на режиме разгона с различными типами глушителей.

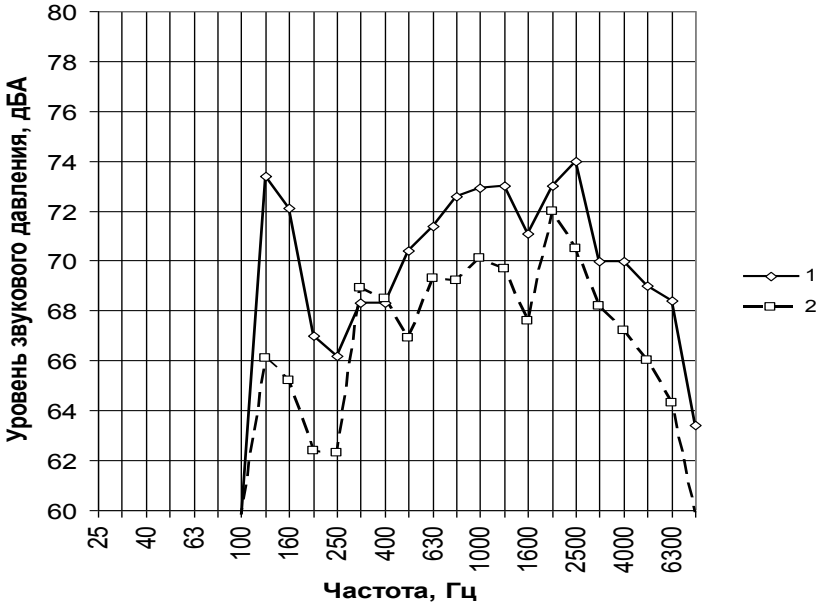


Рисунок 14. Спектры внешнего шума с левой стороны автомобиля КАМАЗ-5460-63: 1 - серийный глушитель (La=83,0 дБА); 2 - глушитель-нейтрализатор (La=80,0 дБА)

Результаты измерений уровней внешнего шума автомобиля КАМАЗ-5460-63 при разгоне на 5-ой низшей передаче приведены в таблице 1.

Таблица 1. - Уровни внешнего шума автомобиля КАМАЗ-5460-63 при разгоне на 5-ой низшей передаче (дБА)

Определяемый параметр	Модель глушителя	
	Серийный глушитель	Глушитель-нейтрализатор
Уровень внешнего шума с левой стороны автомобиля	83,0	80,0
Уровень внешнего шума с правой стороны автомобиля	83,5	80,5
Примечание - В таблице приведены уровни внешнего шума автомобиля за вычетом 1,0 дБА на погрешность измерительных приборов.		

Глушитель-нейтрализатор позволил снизить уровень внешнего шума автомобиля КАМАЗ-5460-63 до 80 дБА.

<u>В четвертой главе</u> представлена методика поиска конструктивных решений по снижению структурного шума при проектировании СООГ на основе расчетно-экспериментального исследования собственных и вынужденных частот и форм колебаний отдельных наружных поверхностей на примере глушителя-нейтрализатора.

Отдельные наружные поверхности конструкции при наличии границы резкого изменения формы, жесткостных, массовых или демпфирующих характеристик на частотах выше 400 Гц имеют присущие им собственные и вынужденные частоты и формы колебаний. Поэтому при разработке мероприятий по снижению акустического излучения от СООГ необходимо исследовать собственные и вынужденные частоты и формы колебаний отдельных поверхностей и для них искать свои решения по уменьшению, излучаемого ими шума.

Звуковая мощность, излучаемая отдельной наружной поверхностью, может быть определена следующим образом:

$$W(f) = \sigma(f) \cdot \rho \cdot c \cdot S \cdot \tilde{V}^2(f) \qquad (9)$$

где, $\sigma(f)$ - коэффициент излучения источника, $(\rho \cdot c)$ - акустическое сопротивление среды, S - площадь излучателя, $\tilde{V}^2(f)$- квадрат среднего значения виброскорости излучающей поверхности.

Граничные условия, учитывающие влияние вибрации от агрегатов автомобиля и дороги, задавались по результатам экспериментальных измерений спектральных характеристик вибрации в местах крепления глушителя-нейтрализатора к раме при движении автомобиля на асфальтовом покрытии и булыжнике. На рисунке 15б показана установка 3-х компонентного вибродатчика и 15а измерения вибрации на асфальтовом покрытии при движении автомобиля со скоростью 40, 60 и 80 км/час и на булыжнике при скоростях движения 30, 50 и 70 км/час.

а б

Рисунок 15. Дорожные вибрационные испытания (а) и установка вибродатчика (б)

На рисунке 16 приведены спектры виброускорений для всех режимов измерения на асфальте (А) и булыжнике (В), которые использовались в качестве граничных условий вибрационного воздействия от дороги и агрегатов автомобиля.

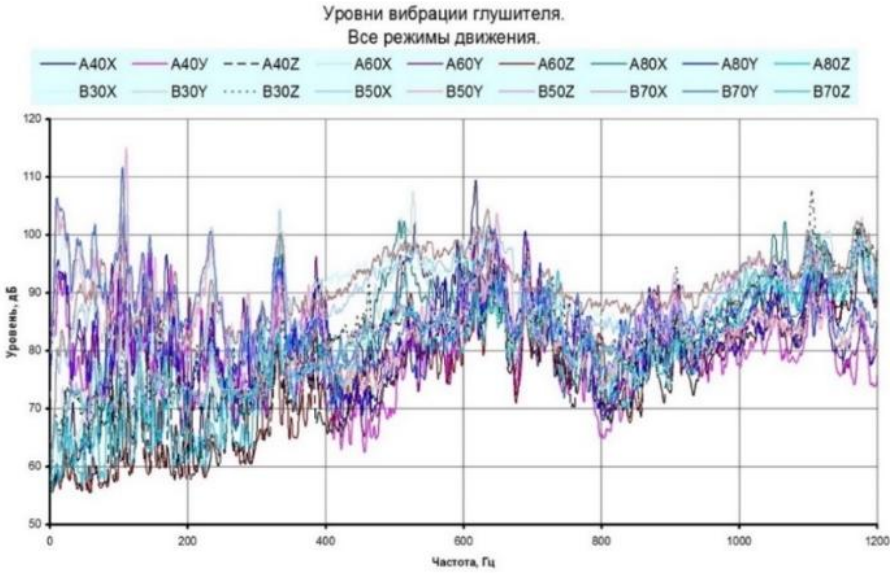


Рисунок 16. Спектры виброускорений для всех режимов движения автомобиля

Кроме того, учитывались влияние динамического воздействия потока отработавших газов в выпускном тракте на частоты и формы колебаний наружных поверхностей глушителя-нейтрализатора. Потому экспериментально на работающем двигателе определялось максимальное значение давления в системе выпуска до каталитического блока.

Экспериментальное определение давления, создаваемого отработавшими газами работающего двигателя, производилось на моторном стенде (Рисунок 17).

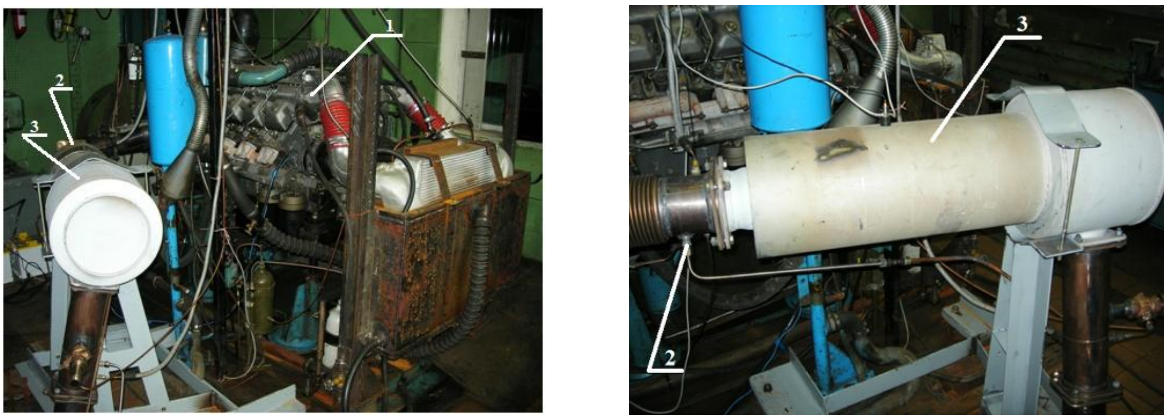


Рисунок 17. Экспериментальное определение давления в СООГ

Максимальное давление в выпускном тракте перед глушителем-нейтрализатором на рабочих температурах во всем диапазоне работы ДВС составило 14,7 кПа.

На рисунке 18 приведена конструкция глушителя-нейтрализатора, на котором выделены три отдельные наружные поверхности, ограниченные резким изменением геометрической формы и жесткости.

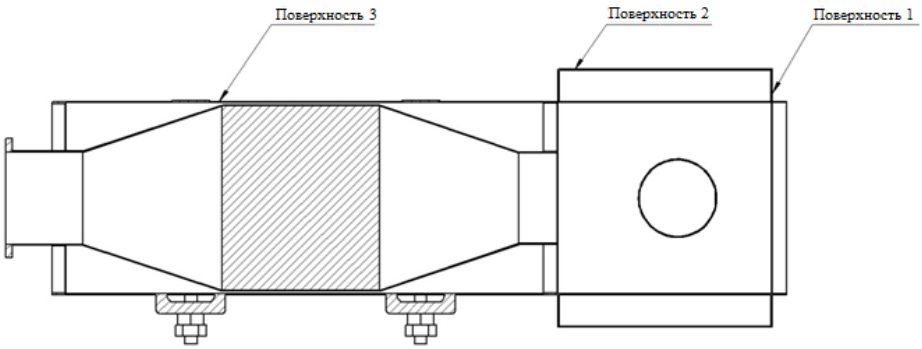
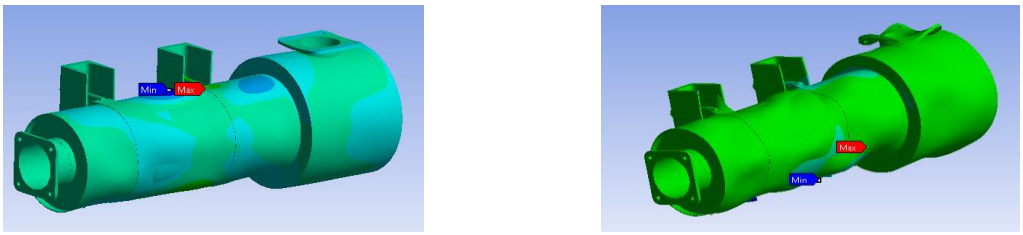


Рисунок 18. Конструкция глушителя-нейтрализатора с тремя выделенными зонами

Производился расчет 40 форм колебаний глушителя-нейтрализатора, 2 из которых для исходной конструкции показаны на рисунке 19.

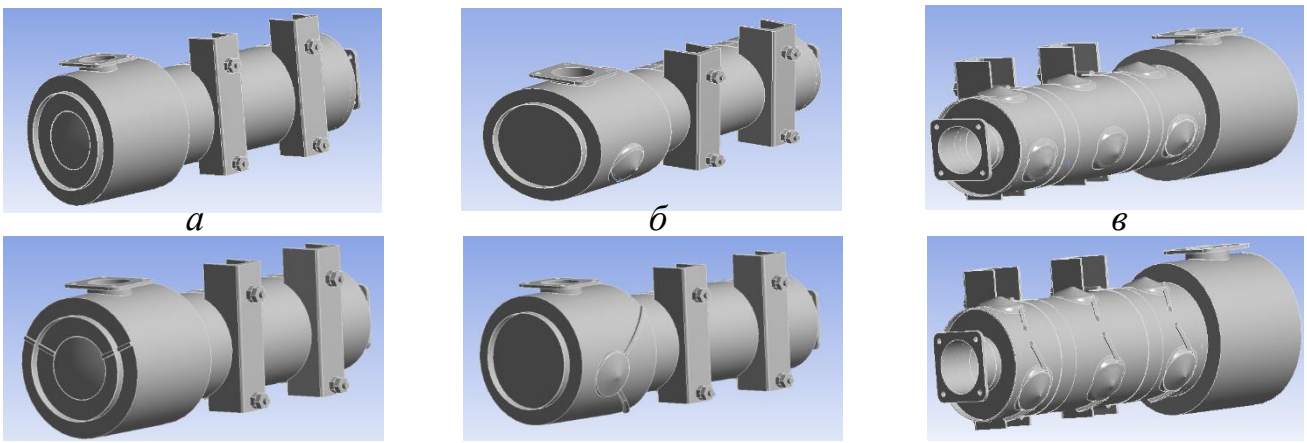
После расчета исходной конструкции на выделенных поверхностях вводились сферические выпуклости различного радиуса и расположения на поверхности и производился расчет частот и форм колебаний. Далее вводились ребра жесткости примыкающие к сферическим выпуклостям. Расчет производился для всех вариантов измененных конструкций и выбирались конструкции с наименьшими значениями виброскорости по выделенным поверхностям.



а *б*

Рисунок 19. Формы колебаний глушителя-нейтрализатора на частоте 3629,4 Гц (а) и 4389,5 Гц (б)

На рисунке 20 показана конструкция с введенными изменениями на поверхности 1, 2 и 3 в виде сферических выпуклостей (Рисунок 20а, 20б и 20в), затем введены ребра жесткости, примыкающие к сферической выпуклости (Рисунок 20г, 20д, 20е).



а *б* *в*

г *д* *е*

Рисунок 20. Конструкция глушителя-нейтрализатора на поверхности 1 (а и г), 2 (б и д) и, 3 (в и е)

В качестве примера приведены расчеты 2-х форм колебаний поверхности 1 на рисунках 21а (2741,3 Гц) и 21г (3522,9 Гц), поверхности 2 на рисунках 21б (3956,1 Гц) и 21д (4431,8 Гц) и поверхности 3 на рисунках 21в (2181,7 Гц) и 21е (3649,7 Гц).

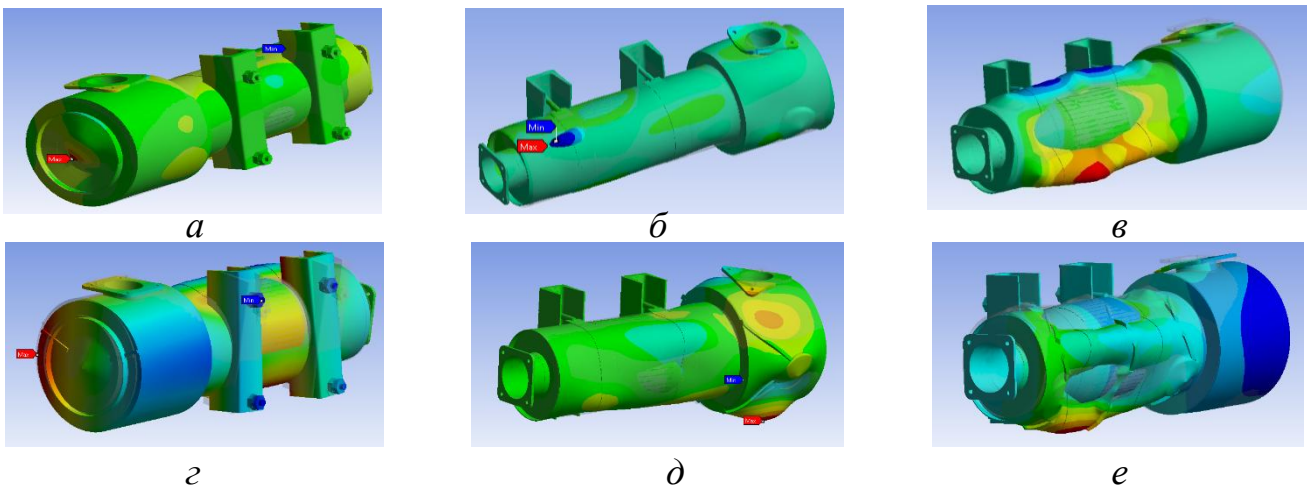


Рисунок 21. Формы колебаний глушителя-нейтрализатора поверхности 1 (а и г), поверхности 2 (б и д) и поверхности 3 (в и е) на различных частотах

С целью оценки эффективности рассматриваемых конструктивных изменений на поверхности 1, 2 и 3 рассчитывались спектры среднеквадратичных значений виброскорости для различных конструктивных изменений. Результат расчетов виброскорости поверхности 1 приведены на рисунке 22а и поверхности 3 на рисунке 22б.

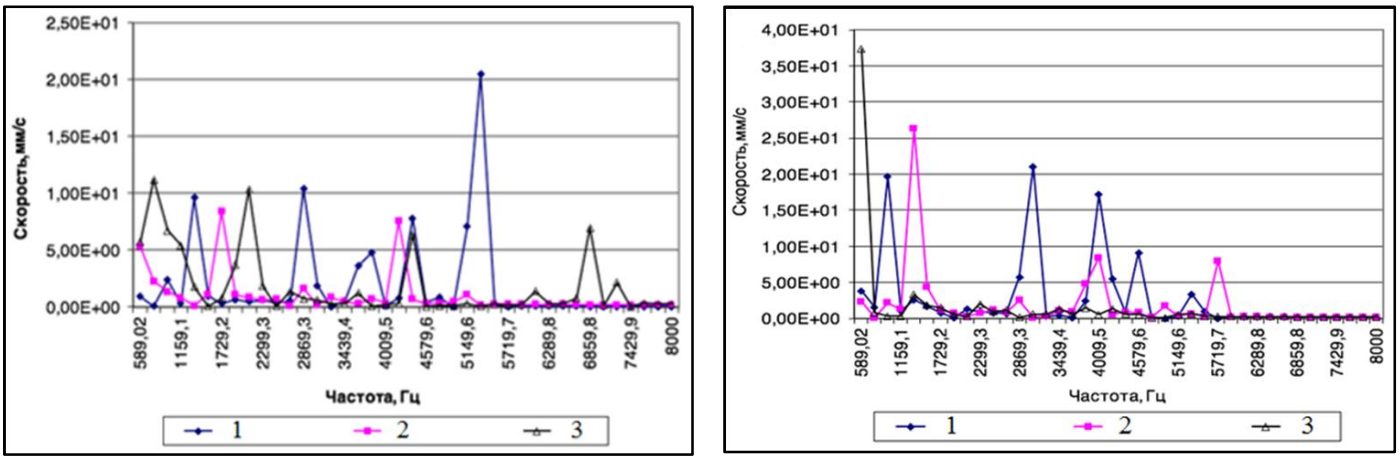


Рисунок 22. Результаты расчета виброскорости глушителя-нейтрализатора: 1 - исходный вариант; 2 - со сферической выпуклостью; 3 - со сферической выпуклостью и ребрами жесткости

С увеличением частоты формы колебаний становятся более сложными. На поверхности 1, 2 и 3 при введении сферических выпуклостей уменьшается число пучностей по сравнению с исходным вариантом и как показывают результаты расчета снижается среднее значение виброскорости на поверхностях.

Таким образом, анализ результатов расчета частот и форм колебаний и распределения среднеквадратичных значений виброскорости по трем отдельным поверхностям глушителя-нейтрализатора показывает, что с целью снижения шума от поверхностей можно рекомендовать введение в ее конструкцию сферических выпуклостей.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны расчетно-экспериментальные методики, экспериментальные стенды и расчетные программы обработки результатов, позволяющие определить акустические характеристики элементов СООГ (каталитические блоки, резонаторные и объемные камеры), необходимые для расчета системы в целом.

2. С использованием разработанных расчетно-экспериментальных методик определены волновые характеристики материалов, используемых в СООГ (каталитические блоки и диссипативные звукопоглощающие материалы).

3. Результаты расчетов и результаты стендовых испытаний элементов СООГ показывают высокую степень точности математической модели (сходимость более 90%).

4. Разработана и реализована методика проектирования СООГ автотранспортных средств на основании акустических характеристик элементов СООГ, полученных расчетно-экспериментальными способами.

5. По разработанной методике конечно-элементного моделирования, с учетом граничных условий разработаны конструкции СООГ, проведен их сравнительный анализ и выбрана конструкция, имеющая наилучшую характеристику по параметру потерь передач, особенно в низкочастотной области до 150 Гц.

6. Эффективность разработанной методики подтверждена испытаниями разработанного и изготовленного глушителя-нейтрализатора в сравнении с серийным в соответствии с ГОСТ Р 41.51-2004:

- глушитель-нейтрализатор снижает на неподвижном автомобиле максимальное значение звукового давления на расстоянии 0,5 м от среза выпускной трубы под углом 45 градусов в третьоктаве 1000 Гц на 9 дБА, в низкочастотной области уровни звукового давления глушителя-нейтрализатора на 2-11 дБА ниже, чем у серийного, в средне- и высокочастотном диапазоне снижение звукового давления у глушителя-нейтрализатора составляет 9 - 20 дБА;

- снижение общего шума по шкале А при движении автомобиля составляет 2 дБА, наибольшее снижение звукового давления в третьоктаве 125 Гц составляет 7,5 дБА, в частотном диапазоне 500 - 1600 Гц звуковое давление снизилось на 2,5 - 3,5 дБА, в диапазоне частот 2500 - 8000 Гц снижение звукового давления составляет 2 - 3.5 дБА.

7. Разработан метод исследования и поиска конструктивных решений по снижению звукового излучения от наружной поверхности глушителя-нейтрализатора АТС на основе расчета и анализа частот и форм колебаний отдельных наружных поверхностей с учетом граничных условий, полученных экспериментально. Наибольшее снижение звукового излучения от наружных поверхностей достигается введением сферических выпуклостей, радиус и расположение которых можно подбирать расчетным способом.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

Научные издания из перечня ВАК РФ:

1. Рахматов Р.И. Тенденция развития систем обработки отработавших газов современных автомобилей / Р.И. Рахматов, В.В. Галевко, Г.Г. Надарейшвили, С.И. Юдин // Естественные и технические науки. - 2014г. - №6(74). -С. 92-96.

2. Рахматов Р.И. Современные методы снижения шума в автотранспортных средствах/ Р.И. Рахматов, В.В. Галевко, Г.Г. Надарейшвили, С.И. Юдин // Научное обозрение - 2014г. - № 8 (часть 2). -С.836-838.

3. Рахматов Р.И. Разработка конечно-элементных моделей и расчетно-экспериментальное исследование систем обработки отработавших газов/ В.В. Галевко, Р.И. Рахматов // Научное обозрение - 2015г. - № 22-С. 129-135.

4. Рахматов Р.И. Конструктивные решения по снижению звукового излучения от наружных поверхностей СООГ/ В.В. Галевко, Р.И. Рахматов // Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) - 2016г. - Выпуск № 3 (46). -С 3-10.

5. Рахматов Р.И. Расчетное и экспериментальное исследование систем обработки отработавших газов / В.В. Галевко, Р.И. Рахматов // Вестник самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение -Том 6, -2017г., Выпуск № 3. -С 145-154.

Публикации в других изданиях:

1. Rakhmatov R. Acoustic characteristics of catalytic units of exhaust system// Galevko V., Rakhmatov R., Nadarejshvily G., Khodosevich K., Yudin S// Proceedings of the 1st International Sciences Conference “Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science”. International Agency for the Development of Culture, Education and Science. Australia, Melbourne, 2014. - P. 139-143.

2. Рахматов Р.И. Определение акустических характеристик каталитических блоков систем обработки отработавших газов / В.В. Галевко, Р.И. Рахматов, Г.Г. Надарейшвили, С.И. Юдин, К.В. Ходосевич // Труды второй Международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин 2014». Самара, 2014. - С. 493-497.

3. Рахматов Р.И. Тенденция развития систем обработки отработавших газов для дизельного двигателя / Рахматов Р.И. // Современные проблемы теории машин. Новокузнецк, 2014. -№2 -С. 141-145.