

на правах рукописи



Малкин Илья Владимирович

Разработка технических средств снижения шумовых излучений системы  
газообмена двигателя легкового автомобиля

05.04.02 - Тепловые двигатели

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Москва - 2014

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет» на кафедре «Управление промышленной и экологической безопасностью».

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент  
**Фесина Михаил Ильич**

Официальные оппоненты:

**Комкин Александр Иванович**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный технический  
университет им. Н. Э. Баумана»,  
профессор

**Галевко Владимир Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Московский  
автомобильно-дорожный  
государственный технический  
университет (МАДИ)», доцент

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный индустриальный  
университет»

Защита состоится « 18 » июня 2014 г. в 14<sup>00</sup> часов

на заседании диссертационного совета Д217.014.01 при  
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

<http://www.nami.ru/activities/scientific-activity/dissertation-council/>

Автореферат разослан « 14 » \_\_\_\_ 05 \_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент  
e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru



Курмаев Ринат Ханяфьевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Шум автомобиля является проявлением высокочастотных динамических процессов, протекающих в механизмах машин. Как известно, в настоящее время легковые автомобили являются наиболее распространенными шумовиброактивными машинами в жизненном пространстве человека, и транспортный шум представляет реальную угрозу здоровью людей. Это указывает на актуальность решения сложившейся проблемы.

Достигнутая оптимизация внутренних узлов глушителей шума (ГШ) системы выпуска отработавших газов (СВОГ) и системы впуска (СВ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в современных конструкциях легковых автомобилей позволяет на данный момент времени обеспечивать эффективное заглушение газодинамической составляющей шумового излучения и исключать какое-либо ее заметное влияние на общие уровни их внешнего и внутреннего шума. Одновременно с этим, в недостаточной степени исследованы и наработаны технические мероприятия по решению проблемы уменьшения структурного шума СВОГ и СВ, излучаемого вибрирующими стенками их корпусных элементов под воздействием динамических деформационных нагрузок от работающего ДВС и пульсирующего газового потока, транспортируемого по их трубопроводным частям, а также потенциалы улучшения шумозаглашающих характеристик моторного отсека (МО) кузова а/м.

**Цель работы** – разработка усовершенствованных расчетных и расчетно-экспериментальных методов и технических средств снижения уровней газодинамического и структурного шума составных элементов СВ и СВОГ ДВС, rationalизованных шумозаглашающих конструкций МО кузова для этапов проектирования и экспериментальной доводки конструкций легковых а/м.

### **Задачи исследования:**

- Исследовать энергетические вклады отдельных шумогенерирующих динамических источников, сосредоточенных в полости МО кузова, в формирование уровней внешнего шума современных легковых а/м.

- Составить технически обоснованные рекомендации по выбору целевых технических требований к вибраакустическим характеристикам и конструктивно-компоновочным исполнениям составных элементов шумоглушения СВ и СВОГ ДВС проектируемых конструкций легковых а/м.

- На примере термовибронагруженной шумоактивной конструкции катализитического коллектора (катколлектора) СВОГ разработать методику экспериментального определения собственных частот и форм колебаний (акустических мод) его корпусных деталей как составных динамических источников структурного шумоизлучения СВОГ ДВС.

- Разработать расчетные и расчетно-экспериментальные акустические модели газодинамического и структурного типов СВ и СВОГ ДВС, как производных источников вибраакустических нагрузок.

- Произвести расчетные, расчетно-экспериментальные и экспериментальные исследования акустических и газодинамических характеристик различных типов исходных и усовершенствованных конструктивных вариантов исполнения СВ и СВОГ ДВС.

- Разработать расчетную акустическую модель МО кузова в виде объемного звукопередающего волноводного элемента, оценить влияние введения различных конструктивных изменений МО на резонансное динамическое возбуждение упругой среды его воздушной полости.

- Провести экспериментальные акустические исследования полнокомплектного легкового а/м, оборудованного опытными образцами рационализированных вариантов конструкций МО.

**Объект исследования** – 50 различных серийных моделей отечественных и зарубежных легковых а/м, оборудованных ДВС рабочим объемом цилиндров от 1,0 до 2,2 л, произведенных в 2000-2010 г.г., опытные образцы легковых а/м, ДВС, СВ и СВОГ ДВС, МО кузова а/м.

**Методы исследования** – инструментальные средства контроля общих уровней шума и спектрального анализа параметров вибраакустических полей, экспериментальные вибраакустические испытания объектов исследований, комплексное математическое моделирование вибрационных, акустических и газодинамических и процессов в системе газообмена ДВС с учетом условий распространения и заглушения звуковой энергии промежуточными замкнутыми волноводными объемами типа МО кузова а/м.

#### **Научная новизна работы:**

- Установлены регрессионные связи эффективных технических характеристик ДВС с габаритами составных элементов СВОГ, позволяющие производить их конструктивно-компоновочную рационализацию.

- Разработана методика бесконтактного измерения и визуализации сканирующим лазерным виброметром собственных частот и форм колебаний термо-вибронагруженных шумогенерирующих корпусных деталей катколлектора СВОГ, формирующих динамическим воздействием акустическое поле в полости волноводного объема МО кузова а/м.

- Обоснованы и реализованы на практике технические принципы совместного комплексного виртуального моделирования вибрационных, акустических и газодинамических процессов, протекающих в составных волноводных элементах СВ и СВОГ ДВС легковых а/м.

- Разработана расчетная акустическая модель МО кузова в виде объемного звукопередающего волноводного элемента, с размещенными в нем виртуальными точечными динамическими источниками объемного колебательного расхода типа «белый шум» и виртуальными приемными микрофонными сенсорами, с использованием расчетного программного обеспечения (ПО) «Виртуальный акустический стенд», позволяющая рационализировать исходные конструктивные варианты исполнения МО и пространственную компоновку отдельных шумогенерирующих источников системы газообмена ДВС в полости МО кузова а/м.

**Практическая ценность работы** – на основании проведенных исследований разработана и запатентована серия технических устройств, обеспечивающих снижение динамических реакций (шумовых излучений) составных элементов системы газообмена ДВС, внешнего и внутреннего шума легкового а/м в целом. Внедрена в производство на ОАО «АВТОВАЗ» усовершенствованная

по акустическим и газодинамическим характеристикам конструкция СВ ДВС. Приняты решения о конструкторско-технологической подготовке для последующего потенциального внедрения разработанных технических решений на перспективных моделях а/м производства ОАО «АВТОВАЗ», ЗАО «Джи Эм-АВТОВАЗ» – в виде интегрального шумозаглушающего модуля МО, шумозаглушающих конструкций кожуха картера сцепления ДВС, объемных звукопоглотителей полости МО. Разработанное ПО «Виртуальный акустический стенд» внедрено в учебный процесс кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью» ТГУ (дисциплина «Промышленная акустика»). Методика проведения экспериментальных исследований шумовибраактивных элементов бесконтактным способом внедрена в учебный процесс кафедры автоматических систем энергетических установок СГАУ в практических занятиях курса «Автоматизация испытаний и экспериментальных исследований».

**Апробация работы и публикации.** Основные положения диссертации представлены, обсуждены и одобрены на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» СГАУ (г. Самара, 21–23 июня 2006 г.), на научном семинаре, посвящённом 70-летию кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 22–23 ноября 2006 г.), на региональной конференции «Безопасность общества и бизнеса: актуальные проблемы» (г. Тольятти, 2010 г.), на II, IV и V Международной научно-технической конференции «Безопасность. Технологии. Управление» SAFETY–2007, –2011 и –2013 (г. Тольятти, 2007 г., 2011 г. и 2013 г.), на Международной научно-технической конференции с участием молодых ученых «Динамика и вибравибраакустика машин» в рамках Международного научно-технического форума, посвященного 100-летию ОАО «Кузнецова» и 70-летию СГАУ (г. Самара, 2012 г.). Материалы диссертации включены в отчет о научно-исследовательской работе «Расчетное моделирование акустических полей в ограниченных объемах шумозаглушающих устройств типа моторных отсеков транспортных средств, расширительных и резонансных камер глушителей систем газообмена ДВС, систем вентиляции и кондиционирования» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы ГК №02.740.11.5122 шифр «2010-1.5-507-001-006» от 09.03.2010. По материалам проведенных исследований выпущено 9 статей рекомендованных ВАК, 4 статьи – в сборниках докладов международных научных конференций, получено 9 патентов РФ на изобретения и 7 патентов РФ на полезные модели, одна заявка на изобретение находится в стадии экспертного рассмотрения в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ (ФСИС РФ) (получено положительное решение).

**На защиту выносятся:**

- Определенные регрессионные зависимости габаритов составных элементов СВОГ от акустических и эффективных технических характеристик ДВС, выполненные на базе проведенного статистического анализа акустических характеристик 50-и различных серийных моделей отечественных и зарубежных легковых а/м.

- Усовершенствованная методика экспериментального исследования собственных форм колебаний термовибронагруженных корпусных деталей катколлектора СВОГ с использованием 3-х компонентного сканирующего лазерного виброметра.

- Результаты комплексного виртуального моделирования вибрационных, акустических и газодинамических процессов, протекающих в составных волноводных элементах СВ и СВОГ ДВС легковых а/м.

- Расчетная акустическая модель МО кузова легкового а/м в виде объемного звукопередающего волноводного элемента, с размещенными в нем виртуальными точечными динамическими источниками объемного колебательного расхода и виртуальными приемными микрофонными сенсорами, для определения динамических откликов упругой среды его воздушной полости при введении в МО различных конструктивных изменений и/или использовании дополнительных технических устройств заглушения шума.

- Разработанные технические устройства уменьшения вибраакустических излучений легковых а/м в виде:

а) шумозаглашающих конструкций СВ ДВС: воздухоочистителя (ВО), оборудованного акустическим патрубком (АП), композитной виброшумомодемпифицирующей структуры корпуса газосборного ресивера (Р), глушителя аэродинамического шума, содержащего дроблено-пористые фрагментированные поглотители звуковой энергии, ГШ СВ ДВС, интегрированного с конструкцией несущей корпусной оболочки бампера кузова АТС;

б) многофункциональных конструкций составных элементов СВОГ ДВС – катколлекторов, оборудованных расширительной газосмесительной камерой и циклоническим Р;

в) конструкций объемных звукопоглотителей, выполненных из монолитных структур пористых звукопоглащающих материалов (ЗПМ), или несущих звукопрозрачных оболочечных, наполненных обособленными дроблеными фрагментированными звукопоглащающими элементами, смонтированных на внутренней поверхности одной или нескольких штатных кузовных панелей – капота, щитка передка, колесных арок кузова, нижнего экрана МО (брызговика ДВС).

г) рационализированных компоновочных схем размещения в полости МО кузова АТС отдельных шумогенерирующих и/или шумозаглашающих элементов, включая конструкции батарей акустических резонаторов, образующих интегральные шумозаглашающие модули АТС, сблокированные с капотом, щитком передка, брызговиком ДВС, бампером кузова, шумопоглащающие конструкции кожуха картера сцепления ДВС.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов и приложения; содержит 201 страницу без приложения, 93 рисунка, 8 таблиц и список использованной литературы, включая ссылки на изобретения и полезные модели, из 203 наименований и 15 страниц приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, определена практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** проведен анализ опубликованных научных работ в области исследования и снижения вибраций и шума АТС. Вопросы разработки шумопонижающих мероприятий для агрегатов и систем а/м рассмотрены, в частности, в работах отечественных и зарубежных ученых Алексеева И.В., Бутакова Г.В., Вайнштейна Л.Л., Вебба Дж. Д., Галевко В.В., Галевко Ю.В., Ежова С.П., Иванова Н.И., Комкина А.И., Ломакина В.В., Луканина В.Н., Муньяла М.Л., Никифорова А.С., Нюнина Б.Н., Осипова Г.Л., Разумовского М.А., Старобинского Р.Н., Стержанова В.П., Тартаковского Б.Д., Тольского В.Е., Тупова В.Б., Фесины М.И., Хекла М., Шахматова Е.В., Юдина Е.Я., и др.

Рассмотрены методы снижения шума автомобильных ДВС, в том числе расчетные способы решения задач по снижению шума. Также проведен обзор типовых конструкций, используемых в шумозаглушающих устройствах АТС.

**Во второй главе** рассмотрены основные источники шума АТС. Представлено уравнение мощностного акустического баланса ДВС в виде выражения (1):

$$W_{ДВС} = W_{корп} + W_{кат} + W_{мод.вп.} + W_{вп} + W_{вып} + W_{вен} \pm W_{МО}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где сумма звуковых мощностей структурной составляющей, генерируемой вибрирующими стенками корпусных элементов ДВС ( $W_{корп}$ ), корпуса кат-коллектора СВОГ ( $W_{кат}$ ), модуля впуска СВ ( $W_{мод.вп.}$ ), газодинамической составляющей СВ (шум впуска) ( $W_{вп}$ ), СВОГ (шум выхлопа) ( $W_{вып}$ ) и крыльчатки электровентилятора радиатора системы охлаждения ДВС ( $W_{вен}$ ), а также ( $W_{МО}$ ) – величина звуковой мощности поглощенной конструктивными элементами МО (знак минус), или усиленной резонансными процессами воздушного объема полости МО (знак плюс), образует шумовое излучение, исходящее из открытых проемов МО АТС в окружающую среду. Указанное уравнение открывает возможности аналитического определения величины энергии акустического излучения каждым источником.

На основе проведенного анализа результатов экспериментальных исследований уровней шума СВОГ, СВ и электровентиляторов модулей системы охлаждения ДВС 50-ти серийных образцов современных моделей легковых а/м установлено, что система газообмена ДВС в составе СВОГ и СВ является одним из доминирующих газодинамических и структурных источников внешнего шума современных моделей легковых автомобилей. Выявлено, что приведенные путем пересчета к базовому расстоянию 7,5 м средние значения уровней шума впуска СВ соизмеримы со средними значениями уровней шума выхлопа СВОГ. При этом, поля доверительных интервалов массива данных, ограниченных верхней границей для СВ и нижней границей для СВОГ перекрывают друг друга на 2,2...6,2 дБА во всем исследуемом диапазоне оборотов работы ДВС. По результатам акустических испытаний и выполненного анализа выданы ре-

комендации по разработке технически-обоснованных требований к конструктивным элементам СВОГ и СВ проектируемых перспективных моделей легковых а/м. Разработаны уравнения регрессии для получения ориентировочных значения параметров СВОГ (табл. 1). Теснота парной связи между исследуемыми параметрами выражалась коэффициентом корреляции, а для оценки статистической значимости связи между случайными величинами, использован коэффициент Стьюдента, который для решаемой задачи выражается формулой (2):

$$t = \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}} \sqrt{n - 2} . \quad (2)$$

Уравнения регрессии для тех случаев, когда связь параметров можно считать достоверной с вероятностью более 0,9, представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

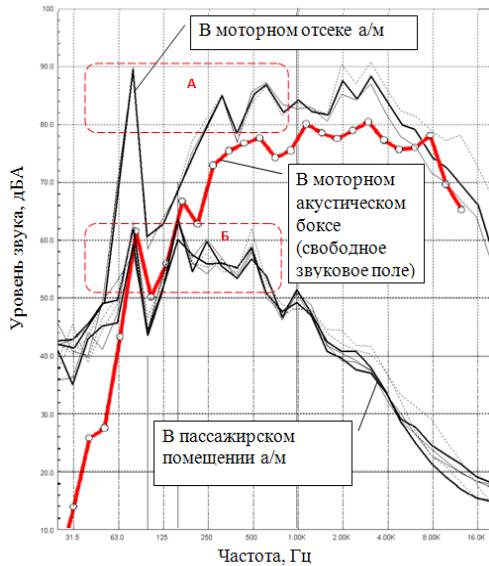
Связанные параметры	Уравнения регрессии	Средняя погрешность, %
La, дБА	Лв <sub>0,5</sub> , дБА	La = 0,13 Лв <sub>0,5</sub> + 63,34
La, дБА	Лв <sub>0,25</sub> , дБА	La = 0,046 Лв <sub>0,25</sub> + 69,57
La, дБА	Vh, л	La = 1,29 Vh + 71,83
La, дБА	Ne, кВт	La = 0,016 Ne + 72,7
Лв <sub>0,5</sub> , дБА	Vгш, л	Лв <sub>0,5</sub> = 87,66 - 0,34 Vгш
Vгш, л	Vh, л	Vгш = 11,11 Vh + 1,22
Vгш, л	Ne, кВт	Vгш = 0,16 Ne + 7,34
D, мм	Vh, л	D = 13,37 Vh + 24,61
D, мм	Ne, кВт	D = 0,193 Ne + 31,39
D, мм	Vгш, л	D = 0,398 Vгш + 38,44
D, мм	La, дБА	D = 1,42 La - 59,0

*Используемые обозначения:* Ne – эффективная мощность ДВС; Vh – рабочий объем ДВС; Vгш – суммарный объем камер ГШ; La - общий уровень внешнего шума а/м; Лв<sub>0,5</sub> и Лв<sub>0,25</sub> – общий уровень шума выхлопа СВОГ, замеренный на открытом пространстве и при стендовых испытаниях, соответственно; D – диаметр проходных сечений трубопроводов СВОГ.

Полученные уравнения регрессии позволяют на начальном этапе проектирования СВОГ определить объем ГШ и диаметры трубопроводных элементов по заданной эффективной мощности ДВС, его рабочему объему и требуемым общим уровням шума. Получаемые расчетом значения являются ориентировочными, окончательные характеристики элементов СВОГ могут быть определены в ходе детальной их проработки на основе доводочных испытаний а/м.

Разработанная экспериментальная методика по определению собственных форм колебаний термовибронагруженных стенок корпуса катколлектора с использованием, 3-х компонентного сканирующего лазерного виброметра тип PSV-400-3D ф. «Politec» (Германия) в составе «холодной» безмоторной установки, позволяет идентифицировать режимы и условия резонансного усиления шумовых излучений в МО легковых а/м (зона А, рис. 1), относительно уровней шумовых излучений, регистрируемых в условиях свободного звукового поля и внутри пассажирского помещения (зона Б, рис. 1). Указанная методика может

быть использована и для других динамически нагруженных виброшумоактивных элементов АТС, позволяя совершенствовать их конструкции на самых ранних этапах проектирования и экспериментальной доводки.

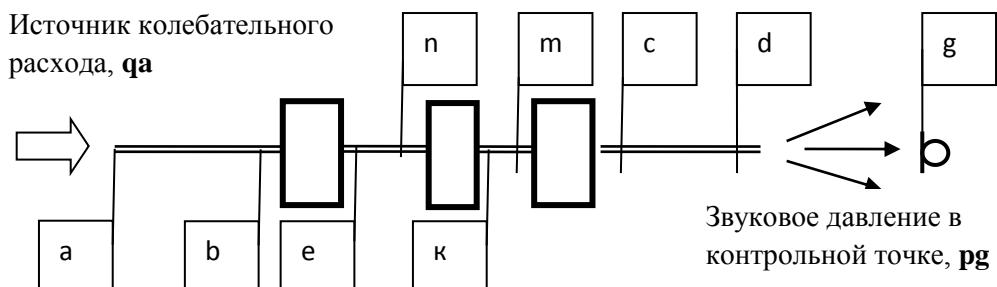


*Рисунок 1 - 1/3-октавные спектры уровней шума автомобилей LADA семейства PRIORA (режим работы ДВС – 2300 мин<sup>-1</sup>), регистрируемые в условиях звукового поля внутри полости МО кузова а/м (в 0,25м от корпуса ДВС), в пассажирском помещении а/м в зоне органов слуха водителя - на режиме интенсивного разгона при включенной 3-й передаче КПП (измерительная точка Б согласно ГОСТ Р 51616), и в условиях свободного звукового поля – в безэховой акустической камере моторного акустического бокса (в 0,25м от корпуса ДВС)*

### **В третьей главе** представлены:

- Результаты комплексного виртуального моделирования акустических и газодинамических процессов, протекающих в составных элементах СВ ДВС легковых а/м.
- Результаты расчетных исследований собственных резонансных частот и форм колебаний термовибронагруженного корпуса катколлектора СВОГ ДВС и его отдельных составных элементов.
- Расчетная акустическая модель МО кузова легкового а/м в виде объемного звукопередающего волноводного элемента, с размещенными в нем виртуальными точечными динамическими источниками объемного колебательного расхода и приемными микрофонными сенсорами.

В процессе акустических исследований было апробировано разработанное ПО «Виртуальный акустический стенд», реализующее принципы синтеза задаваемых характеристик заглушения звуковой энергии, с использованием представлений передаточной функции системы  $Z_{ga}$ , в виде произведений передаточных функций ее отдельных составных волноводных элементов (рис. 2).



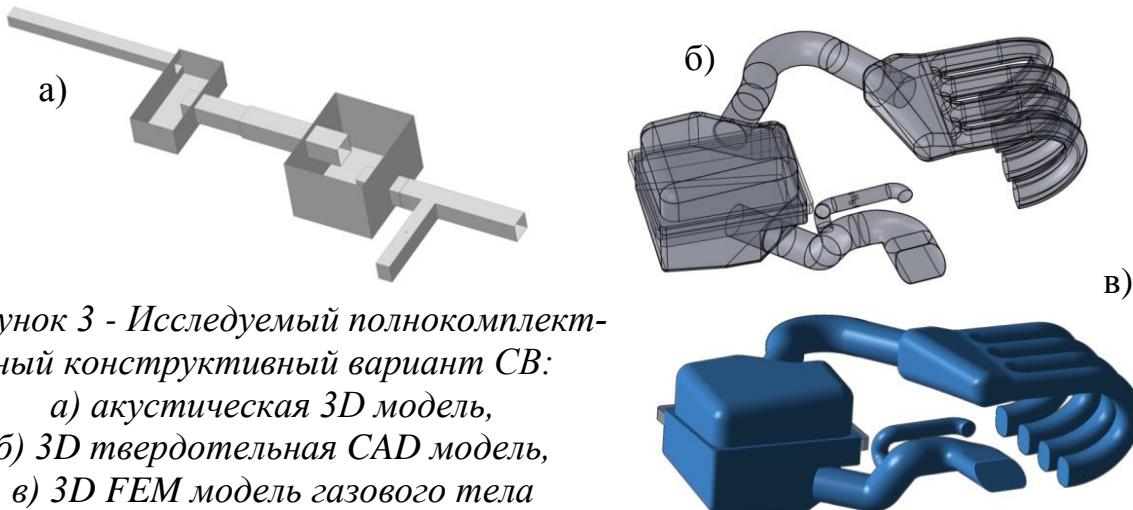
*Рисунок 2 - Схема СВ ДВС представленная последовательной цепочкой акустических волноводных элементов а...d*

Звуковое давление в контрольной точке  $g$  определяется произведением переходных проводимостей  $Y_i$  волноводных каналов связей (патрубков, камер)

и переходных сопротивлений  $Z_i$  объемных волноводных элементов a...d (ГШ). Задачами акустического проектирования представляемых волноводных элементов является синтез их переходного сопротивления  $Z_{ga}$  (целевой функции) согласно выражения (3), обеспечивающей необходимую передачу звуковой энергии:

$$Z_{ga} = \frac{p_g}{q_a} = \frac{p_g}{q_a} * \frac{q_d}{p_c} * \frac{p_c}{q_m} * \frac{q_m}{p_k} * \frac{p_k}{q_n} * \frac{q_n}{p_e} * \frac{p_e}{q_b} * \frac{q_b}{q_a} = Z_{gd} * Y_{dc} * Z_{cm} * Y_{mk} * Z_{kn} * Y_{ne} * Y_{eb} * B_{ba}^{ii} \quad (3)$$

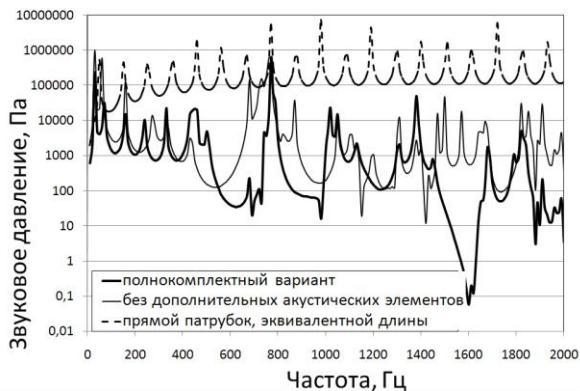
Совместное использование расчетного ПО «Виртуальный акустический стенд», в частности, исполняемой программы «TL.exe» по определению шумозаглашающих характеристик (трансмиссионных потерь TL) объемных расширительных камер и приложения «COSMOS FlowWorks» графическо-расчетного комплекса «SolidWorks», учитывающие результаты исследований акустических и газодинамических характеристик СВ ДВС (рис. 3), позволяет оперативно, с минимальными материальными и временными затратами находить компромиссные конструктивные решения, удовлетворяющие как приемлемой степени шумозаглушки (рис. 4), так и допустимым уровням газодинамического сопротивления и требуемым значениям индекса неравномерности (Uniformity Index) распределения скорости газового потока (рис.5) в полостных волноводных элементах в системе газообмена ДВС, удовлетворяющие требованиям технического задания на разработку и техническими условиями производства.



*Рисунок 3 - Исследуемый полнокомплектный конструктивный вариант СВ:  
а) акустическая 3D модель,  
б) 3D твердотельная CAD модель,  
в) 3D FEM модель газового тела*

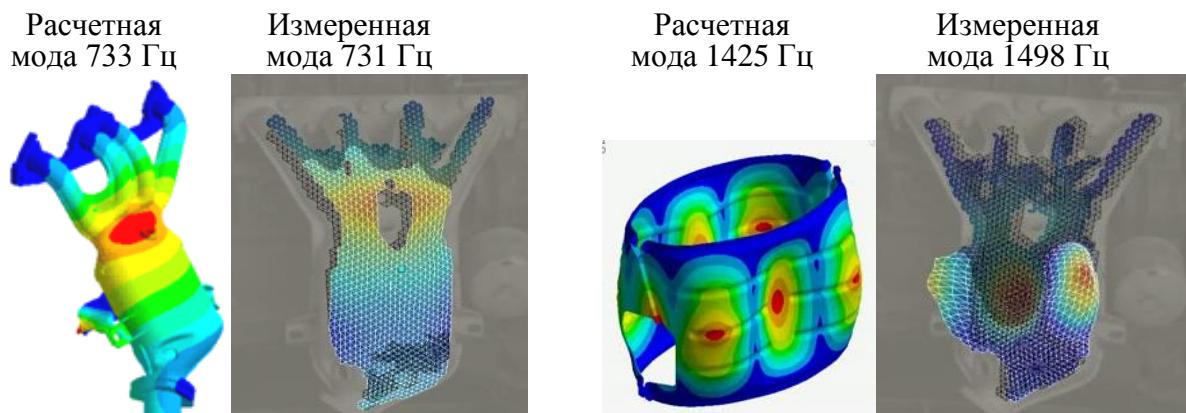
В усовершенствованных конструктивных исполнениях полнокомплектной СВ, применение в ней отдельных штатных шумозаглашающих элементов, не только не увеличивает газодинамическое сопротивление СВ, а напротив, вызывает уменьшение перепада давления, за счет более эффективного сглаживания пульсаций засасываемой воздушной среды, транспортируемой в полостях составных волноводных конструктивных элементов СВ. В тоже время, например, применение АП в полости ВО, обеспечивающее положительный эффект шумозаглушки, в распределении скорости газового потока на входе в фильтрующий элемент ВО влияет отрицательно, уменьшая индекс неравномерности, за счет формирующейся локализованной направленной подачи воздуха в зону

геометрического центра полости камеры ВО.



*Рисунок 4 - Влияние штатных шумозаглашающих элементов СВ, используемых в составе полнокомплектной СВ ДВС, на распределение звукового давления*

Использование расчетных методов определения собственных резонансных частот и форм колебаний катколлекторов СВОГ ДВС, осуществляемых с помощью ПО конечно-элементного анализа «ANSYS», позволяет получить результаты, достаточно точно совпадающие с результатами их экспериментальных исследований (расхождение не более 10%). Таким образом, подтверждена высокая степень достоверности результатов расчетного метода виртуальных испытаний, который может быть успешно применен при исследовании вариантов исполнения конструкций катколлекторов и других элементов СВОГ (рис. 6) на ранних стадиях проектных и опытно-конструкторских работ, не требуя изготовление многочисленных прототипов, что в итоге снижает затраты материальных и временных ресурсов.



*Рисунок 6 - Расчетные и экспериментально измеренные собственные моды механических колебаний стенок корпуса катколлектора СВОГ и его термоакустического экрана*

Виртуальное моделирование корпуса катколлектора СВОГ позволило оценить разнообразные варианты конструктивного исполнения его составных элементов: изменение изгибной жесткости его верхней части в месте фланца крепления, используемой толщины стенки термоакустического экрана, привар-

ки его к крепежному кронштейну, использование междустеночных промежуточных термовиброизолирующих демпфирующих прокладок и др.

Акустическое моделирование МО (рис. 7), с использованием разработанного расчетного ПО «Виртуальный акустический стенд», в частности, исполняемой программы «Test\_rig\_ii.exe», позволяет рационализировать выбор мест расположения (пространственную компоновку) отдельных шумогенерирующих динамических источников в полости МО, осуществлять выбор габаритных длин и площадей проходных сечений горловых частей акустических резонаторов, объемов их камерных частей, введения дополнительных диссипативных рассеивателей акустической энергии и пр.

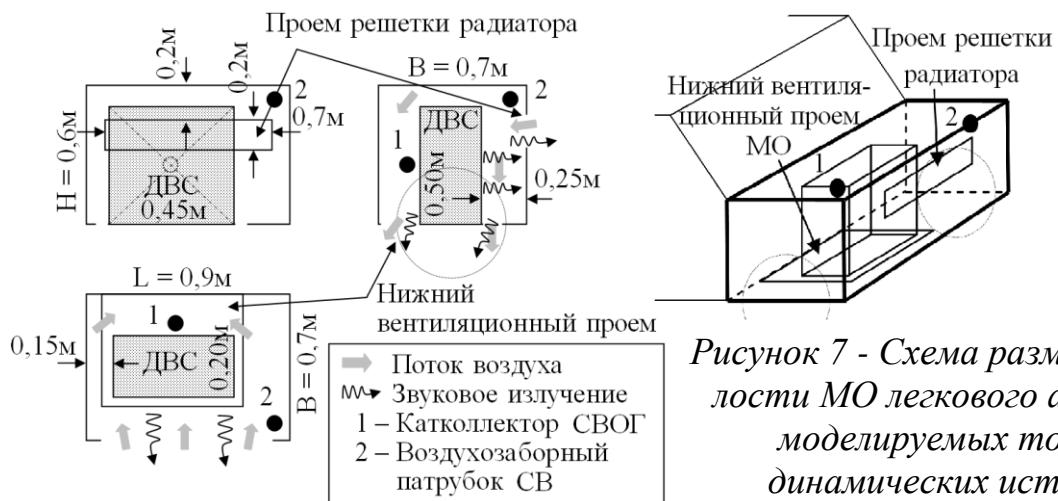


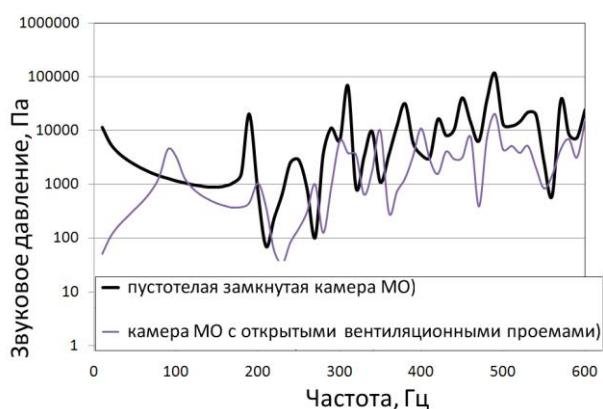
Рисунок 7 - Схема размещения в полости МО легкового автомобиля моделируемых точечных динамических источников шумового излучения

В отличие от ГШ, устанавливаемых в типичных волноводных составных элементах СВ и СВОГ ДВС АТС, выполненных в виде узких протяженных волноводных каналов, подключенных к объемным расширительным и/или резонаторным камерам, в которых преимущественно распространяются плоские звуковые волны с длинами существенно превышающими размеры их поперечных сечений ( $\lambda \gg d$ ), замкнутая полость МО представлена в виде крупногабаритного в поперечном сечении тупикового волноводного канала короткой длины, содержащего открытые вентиляционные проемы. При этом, габариты вентиляционных проемов соизмеримы как с размерами полости МО, так и с длинами распространяемых звуковых волн. Кроме этого, отличительными особенностями является то, что не только моделируемые виртуальные точечные динамические источники объемного колебательного расхода типа «белый шум», но и виртуальные измерительные микрофонные сенсоры располагаются внутри полости МО. В частности, в диссертационной работе показания сенсоров звукового давления регистрировались в центрах проема решетки радиатора и нижнего вентиляционного проема МО. Для моделирования открытых звукоизлучающих проемов МО были использованы адmittансные крышки, представляемые в виде волноводов с нулевой длиной и малым акустическим сопротивлением. Объем корпуса ДВС, вычитаемый из полости МО моделировался обходом вокруг указанного неучитываемого объема.

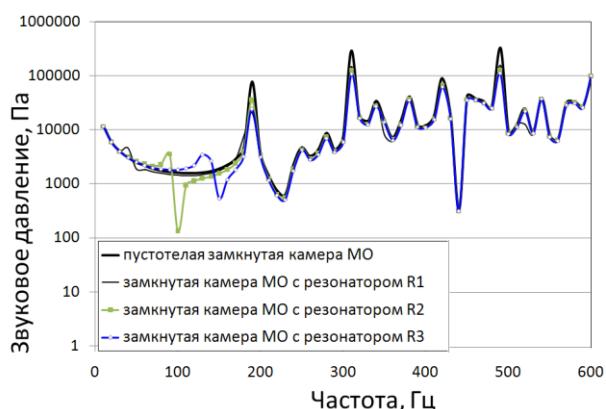
Результаты моделирования МО в виде составного акустического волно-

водного элемента свидетельствуют в частности, что:

- дополнительная футеровка ограждающих стенок МО пористыми ЗПМ обеспечивает снижение звукового давления в полости МО на 25...30 дБ;
- открытые вентиляционные проемы МО существенно меняют характер распределения звуковых давлений на низших собственных акустических модах воздушного объема полости МО по отношению к модели замкнутой пустотелой полости МО (рис. 8);
- наличие корпуса ДВС внутри полости МО не оказывает существенного влияния на характер распределения звукового давления на низших собственных акустических модах воздушного объема полости МО по отношению к модели пустотелой камеры МО;
- подключение к полости МО батарей резонаторов Гельмгольца, настроенных на подавление ее низших собственных акустических мод колебаний, эффективно уменьшает (до 11 дБ) амплитудные значения резонансных колебаний звукового давления в плоскости открытых вентиляционных проемов МО (рис. 9). Рациональный выбор месторасположения горловой части резонатора Гельмгольца в полости МО, предусматривает размещение его открытого среза в зонах вентиляционных проемов и/или в полости МО непосредственно у динамического источника акустического излучения, расположенного в полости МО (открытого среза воздухозаборного патрубка ВО СВ, корпуса катколлектора, электровентилятора модуля системы охлаждения ДВС).



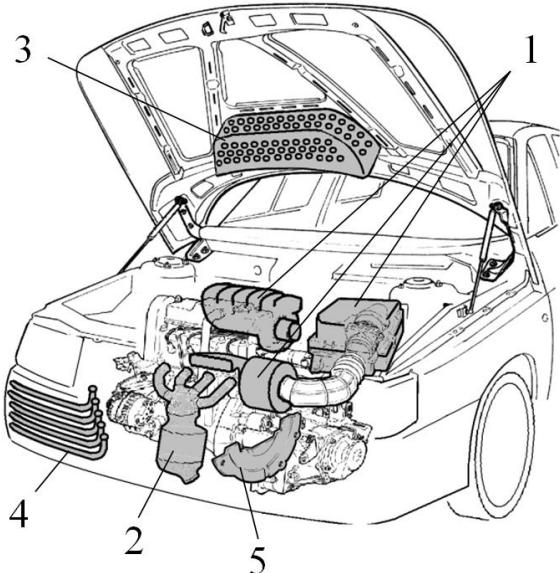
*Рисунок 8 - Влияние открытых вентиляционных проемов на распределение звукового давления в полости МО*



*Рисунок 9 - Влияние подключения резонатора Гельмгольца на распределение звукового давления в полости МО*

**В четвертой главе** представлены описания технических решений и их реализации в составе опытных и серийных образцов легковых а/м. Новизна разработок подтверждается патентами на изобретения и полезные модели, выданными ФСИС РФ (рис. 10). Позициями обозначены:

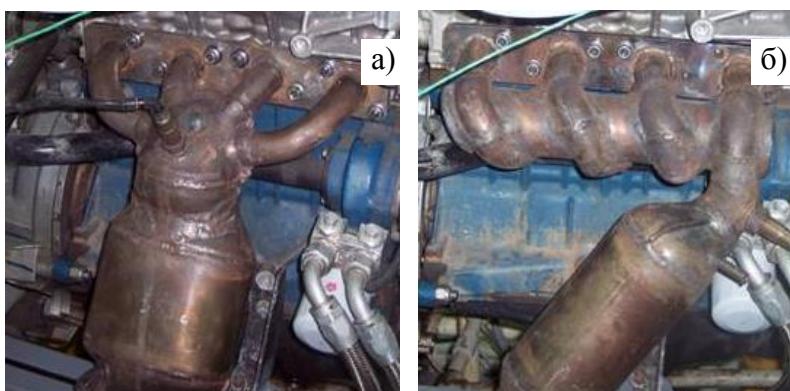
1 – Шумозаглушающие конструктивные элементы СВ ДВС легкового а/м (RU54104, RU2333371, RU2487020, RU2494266). Внедренная в производство модифицированная конструкция воздухозаборного патрубка СВ, в составе ДВС ВАЗ-21124 а/м LADA KALINA, обеспечивает в частности снижение общих



*Рисунок 10 - Схема компоновки шумозаглашающих устройств, разработанных в диссертации на уровне изобретений и полезных моделей*

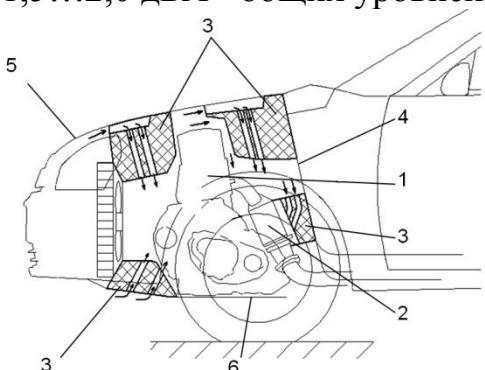
уровней шума впуска в диапазоне оборотов коленчатого вала 2800...5100 мин<sup>-1</sup> – на 1,3...2,1 дБА.

2 – Многофункциональные конструкции элементов СВОГ ДВС легковых а/м, наделенные улучшенными акустическими качествами (RU92097, RU101734) представленные в виде катколлекторов, оборудованных расширительными газосмесительными камерами (рис. 11). Они образуют, в частности, объемные акустические резонаторы, расположенные в зоне выпускных клапанов ДВС, обеспечивающие эффективное демпфирование высокочастотных динамических пульсаций отработавших газов, генерирующих структурный шум стенок корпусов катколлекторов.



*Рисунок 11 - Опытные образцы конструкций катколлекторов СВОГ и их компоновок на ДВС:  
а) с расширительной газосмесительной камерой,  
б) с циклоническим газосборным ресивером*

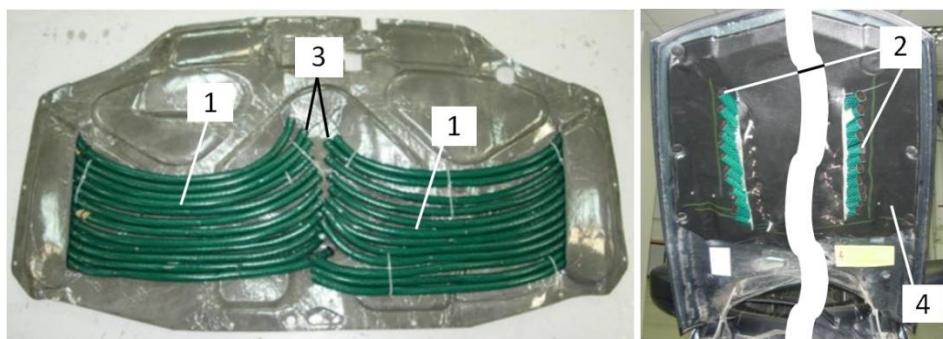
3 – Объемный монолитный звукопоглотитель из вспененного открытоячеистого пенополиуретана (RU2442706), оболочечный звукопоглотитель (RU2442705) в составе полимерного перфорированного корпуса, наполненный обособленными дроблеными фрагментированными звукопоглощающими элементами, монтируемые в подкапотном пространстве МО (рис. 12), обеспечивающие эффекты снижения общих уровней внешнего шума на 1,0 дБА и на 1,5...2,0 дБА - общих уровней внутреннего шума а/м LADA KALINA.



*Рисунок 12 - Компоновочные конструктивные варианты размещения объемных звукопоглотителей в полости МО легкового а/м.  
1 – ДВС, 2 – катколлектор, 3 – объемный звукопоглотитель, 4 – щиток передка,  
5 – капот, 6 – нижний экран МО (брэзговик ДВС)*

4 – Интегральный шумозаглушающий модуль АТС (RU2512134) в виде блокированной модульной батареи акустических резонаторов, открытые горловые части которых сообщены с полостью подкапотного пространства МО. Представленное техническое устройство агрегатировано со штатными функциональными элементами АТС - передним бампером, капотом, модулем системы охлаждения ДВС.

Использование в составе а/м Chevrolet NIVA батареи четвертьволновых акустических резонаторов (рис. 13), обеспечивает снижение уровней внешнего шума на 6,6...8,2 дБ в низко- и среднечастотных областях звукового спектра (40–160 Гц), включающих скоростной диапазон частот второй моторной гармоники ДВС.



*Рисунок 13 - Опытный образец модульной батареи акустических четвертьволновых резонаторов, скомпонованной в полости МО. 1 – батарея четвертьволновых акустических резонаторов, 2 – открытые срезы горловых частей четвертьволновых акустических резонаторов, 3 – жесткие донные части четвертьволновых акустических резонаторов, 4 – капот кузова*

5 – Шумозаглушающие конструкции кожуха картера сцепления ДВС в виде цельноформованной детали из демпфирующего пористого газопроницаемого материала (RU2410556) или содержащие один или более трубчатый вентиляционный канал, выполняющий функцию горловой части резонатора Гельмгольца (RU2333376).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) На базе проведенного статистического анализа акустических характеристик 50-и различных серийных моделей легковых а/м с ДВС рабочим объемом цилиндров от 1,0 до 2,2 л, произведенных с 2000 г. по 2010 г.:

- определены регрессионные зависимости габаритов составных элементов СВОГ от акустических и эффективных технических характеристик ДВС, позволяющие на начальных этапах проектирования проводить обоснованную радиационизацию элементов СВОГ;

- составлены целевые технические требования к акустическим характеристикам и конструктивным исполнениям элементов шумоглушения СВ и СВОГ ДВС проектируемых конструкций легковых а/м.

2) Разработана методика расчетно-экспериментального определения и визуализации собственных частот и форм колебаний термовибронагруженной

шумоактивной конструкции катколлектора СВОГ как составного динамического источника структурного шумоизлучения СВОГ, формирующего интенсивное акустическое поле в полости волноводного объема МО кузова а/м. Использование данной методики позволяет, не производя натурных испытаний, оценивать шумоактивность различных конструктивных вариантов катколлекторов на начальном этапе их проектирования, сокращая время на разработку в два и более раза.

3) Апробирован метод совместного комплексного виртуального моделирования акустических и газодинамических процессов, протекающих в составных волноводных элементах СВ и СВОГ ДВС легковых а/м, с использованием разработанного ПО «Виртуальный акустический стенд» по определению шумозаглашающих характеристик (трансмиссионных потерь) расширительных и резонаторных камер, совместно с приложением «COSMOS FlowWorks» графико-расчетного комплекса «SolidWorks», позволяющие устанавливать компромиссные конструктивные решения с приемлемой степенью шумозаглушения и допустимыми уровнями газодинамического сопротивления. Используя предложенный метод при проектировании СВ а/м LADA KALINA, был достигнут эффект снижения общих уровней шума впуска до 2,1 дБА.

4) Разработана акустическая модель МО кузова легкового а/м в виде объемного звукопередающего волноводного элемента с размещенными в нем виртуальными точечными динамическими источниками объемного колебательного расхода и приемными микрофонными сенсорами, для использования в расчетном ПО «Виртуальный акустический стенд», позволяющая рационализировать исходные конструктивные варианты исполнения МО, проводить соответствующую пространственную компоновку отдельных шумогенерирующих и шумозаглашающих элементов в полости МО с оценкой динамических откликов упругой среды его воздушной полости и акустических качеств различных конструктивных исполнений.

5) Разработана и запатентована серия технических устройств снижения шумовых излучений легковых а/м в виде шумозаглашающих конструкций составных элементов СВ и СВОГ ДВС, объемных звукопоглотителей и интегральных шумозаглашающих модулей АТС, открытые горла которых сообщены с полостью МО, шумопоглощающих структур стенок кожуха картера сцепления ДВС.

6) Результаты диссертационной работы востребованы производственными предприятиями (ОАО «АВТОВАЗ», ЗАО «Джи Эм-АВТОВАЗ») и научно-исследовательскими и образовательными учреждениями (ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»).

## **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК*

- 1) Фесина М.И., Крючков А.Н., Макарьянц Г.М., Малкин И.В. Результаты экспериментальных исследований вибраакустических характеристик каталитических коллекторов систем выпуска отработавших газов двигателей легковых автомобилей. Научный журнал «Известия Самарского научного центра Российской академии наук», 2011, том 13, № 6, с. 179-185.
- 2) Малкин И.В., Фесина М.И., Горина Л.Н., Ковалева А.А. Патентный классификационный анализ глушителей шума системы выпуска отработавших газов двигателей внутреннего сгорания. Безопасность в техносфере №2/2011, с. 18-26.
- 3) Фесина М.И., Малкин И.В., Филин Е.В., Онищенко С.П. Ранжирование акустических качеств автомобильных систем выпуска отработавших газов двигателей. Безопасность в техносфере №4/2011, с. 40-50.
- 4) Фесина М.И., Малкин И.В., Филин Е.В., Онищенко С.П. Оценка уровня шума выхлопа автомобильных систем выпуска отработавших газов двигателей. Безопасность в техносфере №5/2011, с. 36-44.
- 5) Фесина М.И. Горина Л.Н., Старобинский Р.Н., Малкин И.В. Характеристики автомобильных систем выпуска отработавших газов и предъявляемые к ним требования. Безопасность в техносфере №6/2011, с. 39-47.
- 6) Фесина М.И., Малкин И.В., Горина Л.Н., Самокрутов А.А., Филин Е.В., Онищенко С.П. Оценочное ранжирование акустических качеств автомобильных систем впуска воздуха двигателей внутреннего сгорания. Безопасность в техносфере №3/2012, с. 52-60.

### *Публикации в других изданиях*

- 7) Фесина М.И., Ломакин В.В., Малкин И.В. Снижение внешнего шума легкового автомобиля класса В. Материалы докладов научного семинара, посвященного 70-летию кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006 г., с. 331-341.
- 8) Расчетное моделирование акустических полей в ограниченных объемах шумозаглашающих устройств типа моторных отсеков транспортных средств, расширительных и резонансных камер глушителей систем газообмена ДВС, систем вентиляции и кондиционирования, ГК 02.740.11.5122 (заключительный): отчет о НИР / Р.Н. Старобинский, И.В. Малкин [и др.]. ТГУ, УДК 681.85 №01201057500, 2011. – 163 с.
- 9) Малкин И.В. Расчет и оптимизация системы впуска двигателя внутреннего сгорания с точки зрения акустики и газодинамики. Сборник трудов Международной науч.-тех. конф. с участием молодых ученых «Динамика и вибраакустика машин» Международного науч.-тех. форума, посвященного 100-летию ОАО «Кузнецова» и 70-летию СГАУ, 2012 г. Т 2, с. 91-93.
- 10) Малкин И.В., Крючков К.А. Экспериментально-аналитическое исследование вибраакустических характеристик конструкций каталитических

коллекторов двигателя внутреннего сгорания. Сборник трудов Международной науч.-тех. конф. с участием молодых ученых «Динамика и виброакустика машин» Международного науч.-тех. форума, посвященного 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ, 2012 г. Т 2, с. 93-95.

11) Малкин И.В. Моделирование источников шума и элементов его загашения в моторном отсеке кузова автомобиля. Сборник трудов Международной науч.-тех. конф. с участием молодых ученых «Динамика и виброакустика машин» Международного науч.-тех. форума, посвященного 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ, 2012 г. Т 2, с. 95-97.

*В патентах на изобретения и полезные модели*

12) Патент РФ №2333371, F02B29/02. Многоцилиндровый двигатель внутреннего сгорания / М.И. Фесина, В.В. Ломакин, И.В. Малкин, И.В. Дерябин, С.А. Андреянов, публ. 10.09.2008, бюлл. №25.

13) Патент РФ №2333376, F02B77/13. Кожух картера сцепления силового агрегата колесного транспортного средства / М.И. Фесина, В.В. Ломакин, И.В. Малкин, И.В. Дерябин, С.А. Андреянов, публ. 10.09.2008, бюлл. №25.

14) Патент РФ №2410556, F02B77/13, B60R13/08. Кожух картера сцепления силового агрегата колесного транспортного средства / М.И. Фесина, В.В. Ломакин, И.В. Малкин, И.В. Дерябин, С.А. Андреянов, публ. 27.01.2011, бюлл. №3.

15) Патент РФ №2442705, B60R13/08, G10K11/168, F02B77/13. Оболочечный объемный поглотитель звуковой энергии транспортного средства / М.И. Фесина, И.В. Малкин, Л.Н. Горина, публ. 20.02.2012, бюлл. №5.

16) Патент РФ №2442706, B60R13/08, G10K11/168, F02B77/13. Объемный поглотитель звуковой энергии для моторного отсека транспортного средства / М.И. Фесина, И.В. Малкин, Л.Н. Горина, публ. 20.02.2012, бюлл. №5.

17) Патент РФ №54104, F02M35/12, F02M35/14. Система впуска двигателя внутреннего сгорания / М.И. Фесина, Филин Е.В., Ломакин В.В., Малкин И.В., Золотенков Н.А., публ. 10.06.2006, бюлл. №16.

18) Патент РФ №92097, F01N3/28. Каталитический коллектор системы выхлопа отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / А.Б. Морозов, И.В. Малкин [и др.], публ. 10.03.2010, бюлл. №7.

19) Патент РФ №101734, F01N3/28. Каталитический коллектор системы выхлопа отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / В.И. Заражевский, И.В. Малкин [и др.], публ. 27.01.2011, бюлл. №3.

20) Патент РФ №2494266 Шумоглушитель (варианты) / М.И. Фесина, И.В. Малкин [и др.], публ. 27.09.2013, бюлл. №27.

21) Патент РФ №2487020 Автотранспортное средство / М.И. Фесина, И.В. Малкин, Л.Н. Горина, А.И. Самокрутов, публ. 10.07.2013, бюлл. №19.

22) Патент РФ № 2512134 (заявка на изобретение RU 2012132157, F02B). Интегральный шумозаглушающий модуль автотранспортного средства / М.И. Фесина, И.В. Малкин [и др.], публ. 10.04.2014, бюлл. №10.