

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАТАЛИТИЧЕСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ СИСТЕМ ВЫПУСКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

© 2011 М.И. Фесина¹, А.Н.Крючков², Г.М.Макарьянц³, И.В.Малкин¹

¹ Тольяттинский государственный университет

² Институт акустики машин при Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королёва (национальном исследовательском университете)

³ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 27.09.2011

Рассматриваются вопросы повышенного шумоизлучения каталитических коллекторов СВОГ легковых автомобилей. Показан их значительный вклад во внешний и внутренний шум автомобиля, что значительно ухудшает его эксплуатационные и имиджевые качества. Представлены результаты модального исследования катколлекторов отечественного производства с помощью трехмерного сканирующего виброметра. Установлена повышенная плотность собственных частот катколлектора в частотном диапазоне его повышенной акустической активности. Предложены мероприятия по улучшению акустических характеристик катколлекторов.

Ключевые слова: глушитель шума (ГШ), легковой автомобиль, поршневой двигатель внутреннего сгорания (ПДВС), система выпуска отработавших газов (СВОГ), каталитический коллектор (катколлектор).

Легковые автомобили, в силу их плотного количественного распределения по селитебным территориям, являются самым распространенным источником загрязнения окружающей среды токсическими, акустическими, тепловыми и прочими вредными выбросами. По этой причине, законодательные международные и национальные требования, ограничивающие степень этого загрязнения – периодически ужесточаются, а конструкции легковых автомобилей – подвергаются непрерывному совершенствованию. В первую очередь, усовершенствованию подвергается силовой агрегат, включающий поршневой двигатель внутреннего сгорания (ПДВС), как доминирующий источник указанных видов загрязнения. В частности, это подразумевает разработку и внедрение в производство эффективных технических устройств уменьшающих выброс токсических веществ, таких как СО, NO_x, СН, а также, твердых частиц сажи в составе отработавших газов (ОГ), базальтовых и стеклянных волокон, выдуваемых газовым потоком из камер глушителей шума (ГШ) систем выпуска отрабо-

тавших газов (СВОГ), содержащих такого типа звукопоглощающие материалы (ЗПМ) в виде волокнистых набивок. Следует также отметить, что СВОГ легковых автомобилей является весьма интенсивным источником тепловых и акустических выбросов в окружающую среду. В особенности, эта проблема обостряется при использовании малоэффективных и недолговечных конструкций ГШ СВОГ. Проблема токсических, тепловых, акустических и прочих видов загрязнений имеет место не только по отношению к открытым пространствам селитебных территорий. Она относится и к среде обитания водителя и пассажиров, которые также нуждаются в необходимой защите от указанных вредных воздействий, как в отношении самочувствия, утомляемости и здоровья, так и обеспечения безопасности эксплуатации такого шумоактивного легкового автомобиля.

Как свидетельствуют проведенные экспериментальные исследования и результаты официальных процедур сертификации и омологации легковых автомобилей по внешнему и внутреннему шуму (ГОСТ Р41.51, ГОСТ Р 51616, правил R 51-02 ЕЭК ООН) такой составной многофункциональный элемент СВОГ ПДВС как каталитический коллектор (катколлектор), интегрирующий технические устройства выпускного коллектора и функционального модуля каталитического нейтрализатора, представляющего устройство уменьшения выбросов токсических компонентов СО, NO_x, СН в составе ОГ, – может являться существенным источником «паразитных» шумовых

Фесина Михаил Ильич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью». E-mail: michailfes@yandex.ru

Крючков Александр Николаевич, доктор технических наук, исполнительный директор. E-mail: kan@ssau.ru

Макарьянц Георгий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматические системы энергетических установок». E-mail: tak-georgy@yandex.ru

Малкин Илья Владимирович, аспирант кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью». E-mail: malkiniv@rambler.ru

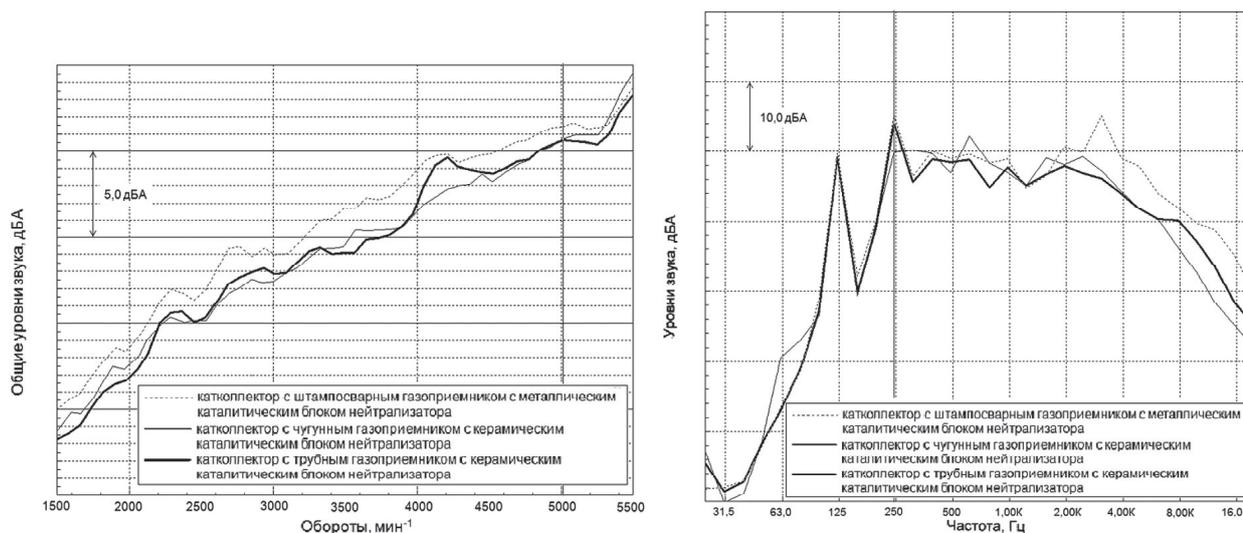


Рис. 1. Графики общих уровней звука и уровней звука в 1/3-октавном спектре на оборотах коленчатого вала 3800 об/мин в подкапотном пространстве моторного отсека в 0,5 м от корпуса ДВС

излучений в ограниченное пространство его моторного отсека (рис. 1), пассажирского помещения (рис. 2) и на открытое пространство окружающей среды (рис. 3). Различные уровни шумовых излучений при установке отличающихся конструкций катколлекторов на один и тот же образец ПДВС регистрируются в исследовательском моторном акустическом боксе (рис. 4).

В зависимости от установки на испытуемый ПДВС конкретных конструктивно-технологических версий исполнения катколлектора (с литым чугунным, с трубным, либо с штамповварным газоприемником, содержащим керамический или металлический блок активного носителя, а также с учетом применения в составе СВОГ тех или иных структурных вибродемпфирующих и/или шумоизолирующих элементов, смонтированных непосредственно на корпусе катколлектора и/или на близлежащих кузовных элементах), катколлектор может ста-

новиться в большей или меньшей степени интенсивным излучателем шума [1-6], вносящим, весьма существенный вклад в звуковое поле легкового автомобиля (см. рис. 1-4).

В качестве иллюстративного примера, представлены результаты акустических исследований образца катколлектора с стальной штамповварной конструкцией входного газоприемника, оборудованного металлическим каталитическим блоком нейтрализатора (см. рис. 5а, а также технические описания патентов RU67647, RU2289025, RU2292468, RU2341664), образца катколлектора с чугунным входным газоприемником, оборудованного керамическим каталитическим блоком нейтрализатора (см. рис. 5б), а также катколлектора с стальной трубной конструкцией входного газоприемника, оборудованного керамическим каталитическим блоком нейтрализатора (см. рис. 5в, а также технические описания патентов RU78869, RU89626, RU89628).

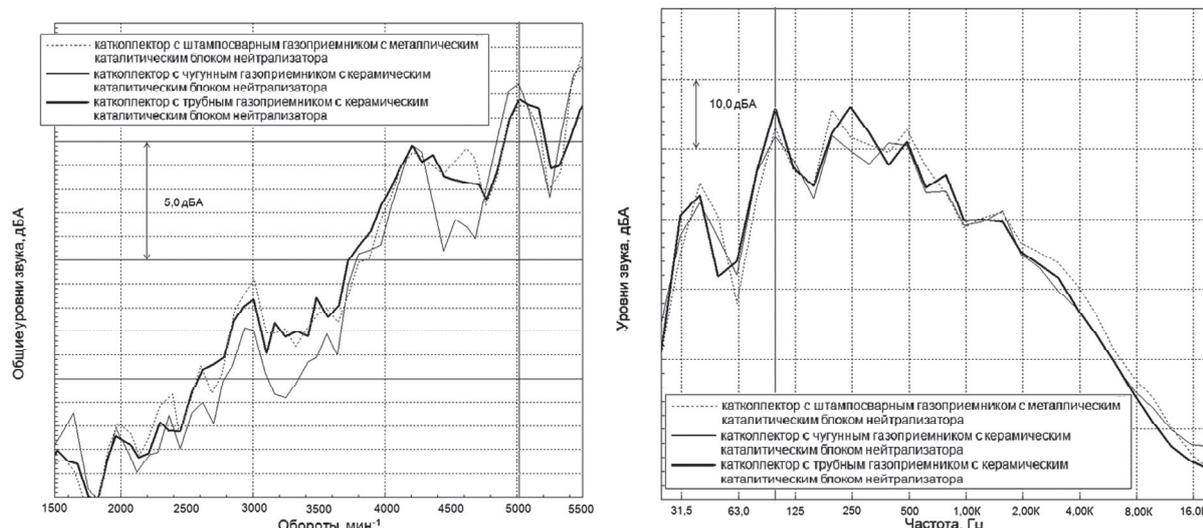


Рис. 2. Графики общих уровней звука и уровней звука в 1/3-октавном спектре на оборотах коленчатого вала 3300 об/мин в контрольной точке в пассажирском помещении автомобиля в зоне правого уха водителя

комплектация	общие уровни внешнего шума, дБА					
	II передача		III передача		замер.	прин, (-1 дБА)
	слева	справа	слева	справа		
катколлектор с штамповарным газоприемником с металлическим каталитическим блоком нейтрализатора	76.9	76.8	74.5	74.4	75.7	74.7
катколлектор с чугунным газоприемником с керамическим каталитическим блоком нейтрализатора	75.0	75.6	73.8	73.3	74.7	73.7
катколлектор с трубным газоприемником с керамическим каталитическим блоком нейтрализатора	76.2	76.2	73.8	73.8	75.0	74.0

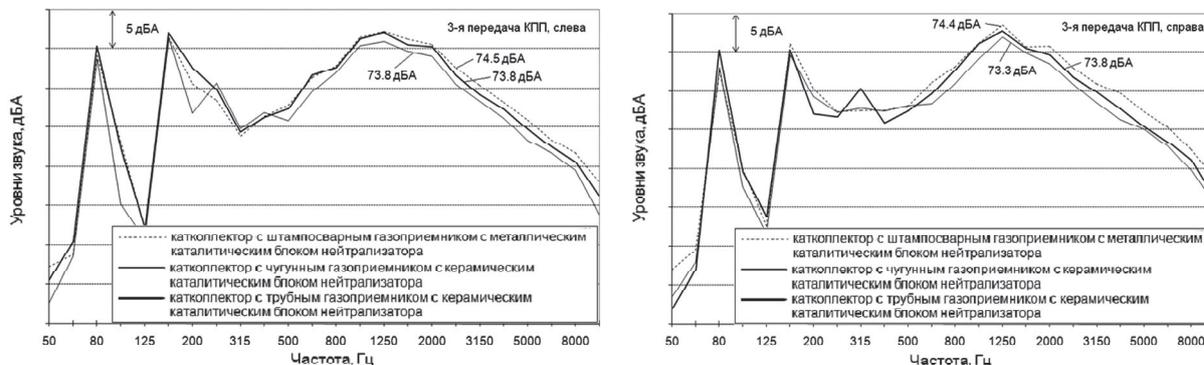


Рис. 3. Таблица общих уровней внешнего шума автомобиля и графики 1/3-октавных спектров уровней внешнего шума автомобиля

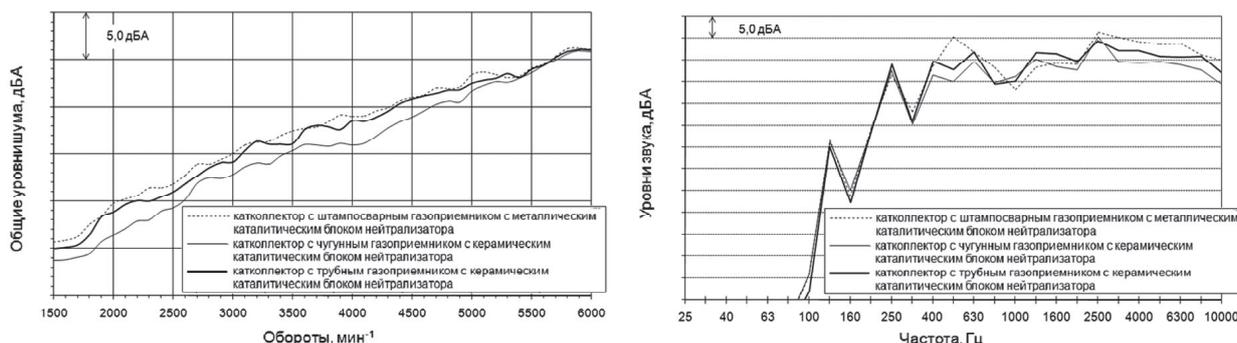


Рис. 4. Графики общих уровней звука и уровней звука в 1/3-октавном спектре на оборотах коленчатого вала 3900 об/мин в 1 м от корпуса ДВС со стороны установки катколлектора в моторном акустическом боксе

Анализ представленных результатов экспериментальных исследований наглядно иллюстрирует наличие качественных корреляционных взаимосвязей доминирующих частотных диапазонов шумового излучения, производимого тем или иным образцом катколлектора (звукового излучения, регистрируемого в моторном акустическом боксе и звукового излучения, регистрируемого в подкапотном пространстве моторного отсека легкового автомобиля), сопоставляемых со спектрами внешнего шума автомобиля (регистрируемого на открытом пространстве в 7,5 м от центральной продольной плоскости автомобиля по методикам ГОСТ Р 41.51 и правил 51-02 ЕЭК ООН) и спектрами внутреннего шума автомобиля (регистрируемого в продольной центральной плоскости в пассажирском помещении автомобиля в зоне правого уха водителя по методике ГОСТ Р 51616). Весьма существенными по регистрируемой аппаратными средствами измерений величине разностей общих уровней

внешнего и внутреннего шума автомобилей, является использование той или иной конструкции катколлектора. Регистрируемый шумопонижающий эффект может составлять до 3дБА, как следует из представленных результатов в характерном частотном диапазоне 1...16 кГц доминирующего шумового излучения катколлектора. Использование менее шумоактивных конструкций катколлекторов позволяет достигать шумопонижающих эффектов равных 2...6 дБ. Следует заметить, что рассматриваемая проблема разработок низкошумных конструкций катколлекторов СВОГ ДВС актуальна не только по отношению к нормируемым стандартами предельно-допустимым значениям общих уровней шума на конкретных регламентированных режимах испытаний автомобилей. Данная проблема имеет самое непосредственное отношение и к формированию приемлемых комфортно-эксплуатационных характеристик автомобилей. Тем самым, ее успешное разрешение отражается

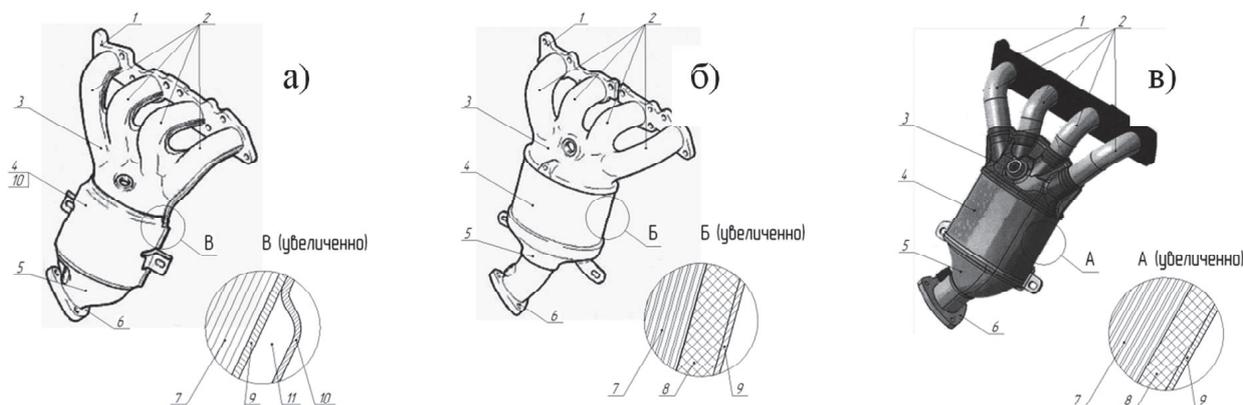


Рис. 5. Внешний вид катколлекторов:

а – с штамповарным входным газоприемником с металлическим каталитическим блоком нейтрализатора;
 б – с чугунным входным газоприемником с керамическим каталитическим блоком нейтрализатора;
 в – с трубным входным газоприемником с керамическим каталитическим блоком нейтрализатора;
 1 – фланец входных патрубков, 2 – входные патрубки, 3 – входной газоприемник, 4 – каталитический блок, 5 – выходной газоприемник, 6 – фланец выходного патрубка, 7 – структура каталитического носителя, 8 – уплотняющая термо-виброизолирующая прокладка, 9 – корпус каталитического блока, 10 – термоакустический экран катколлектора, 11 – воздушный зазор

на улучшении имиджевых и затратных параметров, связанных, в конечном итоге, с конкурентными показателями производимой продукции. Учитывая массовый характер мирового производства легковых автомобилей, исчисляемый многими десятками миллионов штук в год, необходимостью осуществлять их поставки на вторичный рынок для автомобилей находящихся в эксплуатации в огромных количествах (с учетом их рабочего ресурса, надежности и долговечности) с соблюдением минимизированных целевых показателей при приемлемой эффективности очистки ОГ от токсических компонентов, в жестких рамках габаритно-весовых и компоновочных ограничений и т.п. – решение данной технической проблемы представляется весьма затруднительным. В этом отношении, успешное решение виброакустических проблем катколлектора (обеспечение свойств слабого излучения структурного звука его тонкостенными корпусными элементами) в общем перечне комплексных противоречивых задач разработки эффективной (с технической и стоимостной точки зрения) конструкции катколлектора, должно, прежде всего, решаться на самых ранних стадиях их разработки, с максимальным привлечением средств расчетного и расчетно-экспериментального инструментария.

Для идентификации источников и механизмов генерирования структурного шума корпусными элементами катколлектора производились его экспериментальные исследования как в составе «холодной» безмоторной установки, так и в составе полнокомплектного ПДВС, установленного в моторном боксе с использованием 3-х компонентного сканирующего лазерного виброметра

PSV-400-3D фирмы «Polytec» (Германия) [7, 8].

Собственные формы колебаний (колебательные моды) каталитического коллектора определялись на «холодной» безмоторной установке, состоящей из установленного на несущей раме на штатных виброизоляционных опорах подвески силового агрегата корпуса ПДВС, с закрепленным на нем катколлектором. Внешний вид установки и измерительной лазерной системы представлены на рис. 6.

На рис. 7 представлена спектрограмма динамического отклика усреднённой по поверхности корпуса катколлектора значения амплитуды виброскорости на силовое широкополосное воздействие штока шейкера в диапазоне частот 50...5 000 Гц.

При этом, каждой резонансной частоте (или группе частот) поставлено в соответствие собственные формы колебаний конструкции катколлектора, представленные на рис. 8. Выявлена закономерность, что при увеличении частоты возбуждения образца катколлектора проявляются вначале собственные моды колебаний его термоэкрана, а затем, – через небольшой частотный интервал данные собственные моды проявляются в несколько искаженной форме, обусловленной, по-видимому, их взаимодействием с колебанием труб и плоской части газоприемника. Представленные результаты эксперимента указывают на весьма плотное расположение собственных мод конструкции в диапазоне частот 2,5...4 кГц.

Регистрируемые собственные колебательные моды отдельных составных элементов катколлектора можно подразделить на балочные низкочастотные моды, оболочечные моды термоакустического экрана на средних и высоких частотах



Рис. 6. Внешний вид «холодной» безмоторной установки и лазерного вибросканирующего измерителя

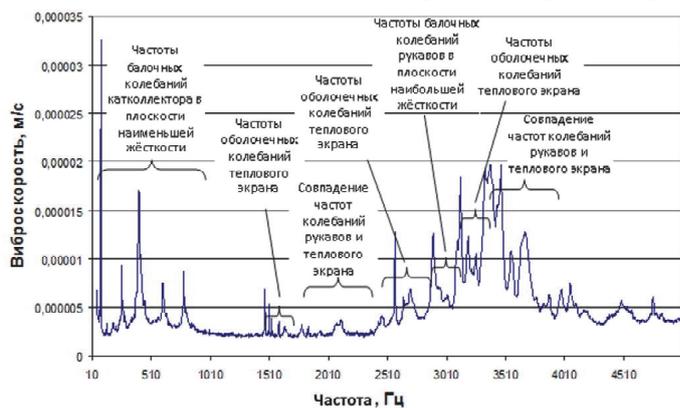


Рис. 7. Спектрограмма отклика значения амплитуды виброскорости на динамическое воздействие шейкером в диапазоне от 50 до 5 000 Гц, усреднённого по поверхности катколлектора

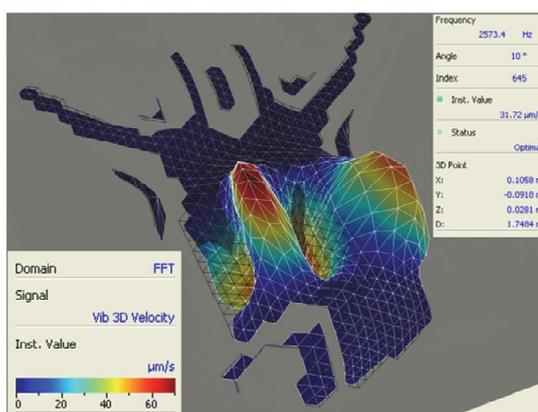


Рис. 8. Собственная колебательная мода на частоте 2573,4 Гц (частота оболочечных колебаний теплового экрана)

тах, а также связанные взаимодействующие резонансные колебания термоэкрана с колебательными модами других составных элементов конструкции (приемных труб газоприемника, ограниченной поверхности корпуса в зоне места установки управляющего датчика кислорода). Результаты проведенных исследований на «холодной» безмоторной установке свидетельствуют о том, что доминирующий вклад в формирование общего вибрационного поля катколлектора вносит его термоэкрэн. Показатели виброскорости, ускорения и перемещений точек термоэкрэна значительно превышают аналогичные показатели других составных частей конструкции. Его высокая виброактивность может быть обусловлена малой толщиной металлической структуры термоэкрэна составляющей 0,8 мм, в то время как каждый из штампованных

полукорпусных элементов катколлектора изготовлен из стального листа толщиной 2 мм.

Спектр шумового излучения катколлектора замеренного в 1/3-октавном диапазоне (рис. 9), в достаточной степени коррелирован со спектром виброскорости его корпусных элементов. Последний характеризуется большой плотностью сосредоточенных в диапазоне частот 2800...3700 Гц собственных колебательных мод. Доминирующее шумовое излучение сосредоточено, преимущественно, в указанном частотном диапазоне. Наибольшие уровни шума также приходятся на эти частоты. На рис. 10 показана карта интенсивности звука, излучаемого катколлектором при его модальных испытаниях.

Проведенный модальный анализ выявил значительное число собственных мод колебаний катколлектора, начиная с его низших собствен-

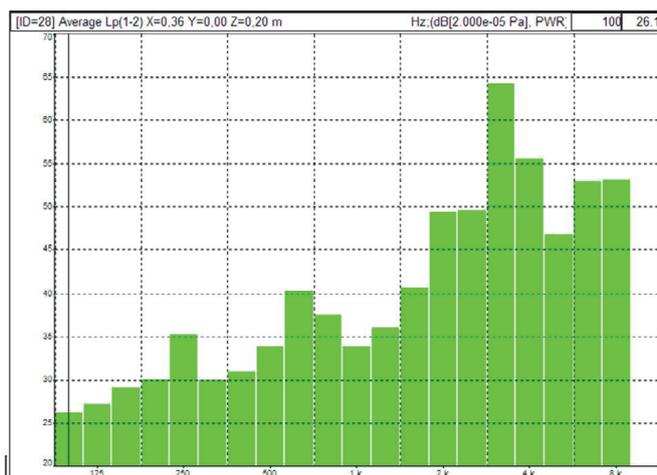


Рис. 9. 1/3-октавный спектр шума катколлектора при его модальных испытаниях

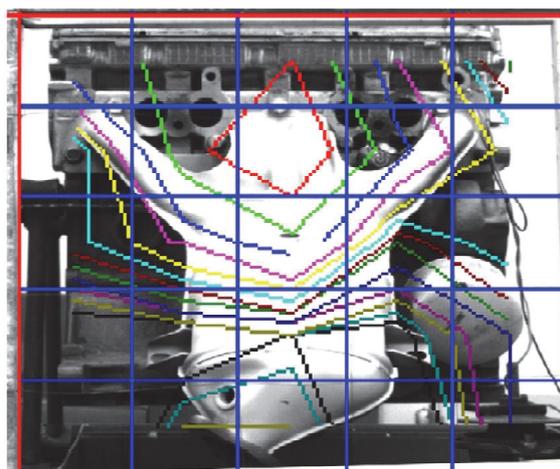


Рис. 10. Распределение интенсивности звука при модальных испытаниях (630 Гц)

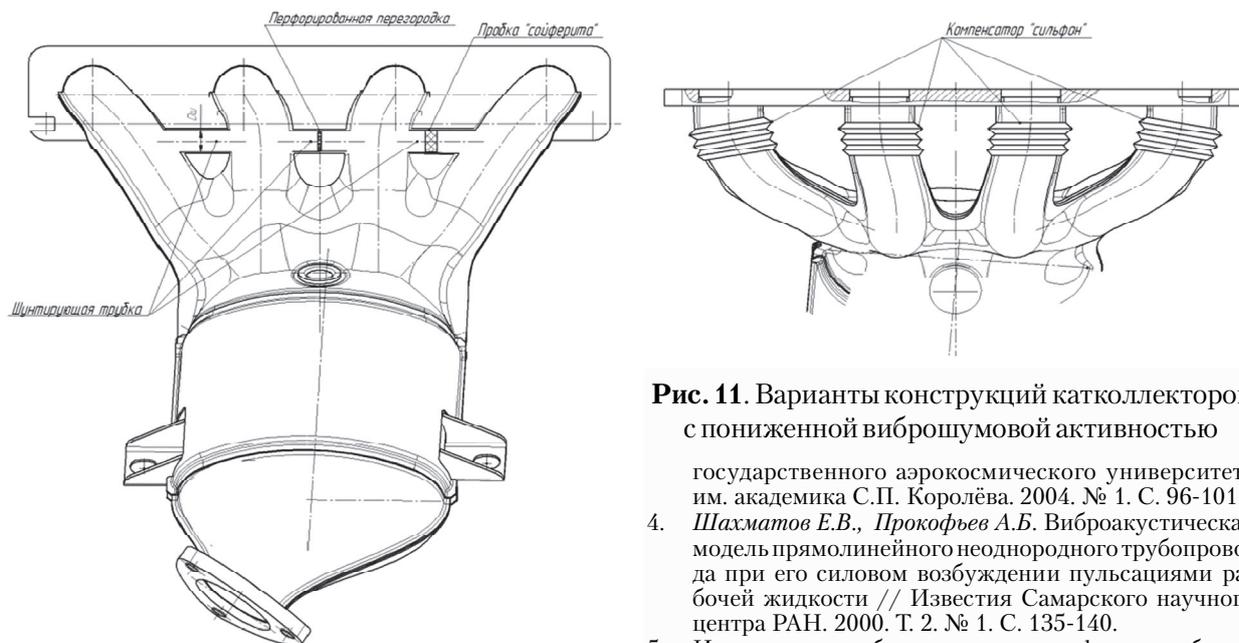
ных мод типа балочных форм, соответствующих частотам 80...800 Гц и заканчивая сложными комбинационными формами взаимодействия высокочастотных колебаний термоэкрана и приемных труб с частотами 3300...3780 Гц и выше. Наибольшая плотность собственных мод высокой интенсивности сосредоточена в диапазоне частот 2500...3800 Гц, что соответствует доминирующему акустическому излучению конструкции катколлектора при его модальных испытаниях.

В качестве потенциальных технических приемов подавления шумового излучения от корпусных (трубопроводных, коробчатых) элементов катколлектора, некоторые из которых авторами планируется подвергнуть подробным акустическим исследованиям, можно отметить:

- использование конструкционных материалов с более высоким внутренним трением (например, применение чугуна вместо стали);
- применение двухслойных (с различным сочетанием толщин слоев) конструкций стенок корпусных деталей, реализующих эффект сухого кулонового демпфирования в процессе изгибных динамических деформаций стенок;
- использование трехслойных композитных структур в качестве конструктивных элементов стенок корпусных деталей (коробчатых элементов), содержащих внутренний высокотемпературный термоакустический слой (вибродемпфирующий, звукопоглощающий, звукоизолирующий);
- конструктивное формирование динамически жестких выпукло-вогнутых геометрических форм стенок коробчатых корпусных деталей;
- применение внешних или внутренних несущих и/или промежуточных перфорированных пористых составных многослойных композитных слоев стенок коробчатых корпусных деталей;
- применение высокотемпературных термо-виброизоляционных виброшумо-демпфирующих прокладок, монтируемых между активным

каталитическим блоком и несущими стенками корпуса катколлектора, в том числе, изготовленных, например, из материалов типа «сойферит» (метало-резины – МР), прессованных сетчатых материалов – ПСМ, плетено-волокнистых материалов – ПВМ;

- применение динамических виброгасителей, настроенных на дискретные резонансные частоты изгибных колебаний стенок корпуса катколлектора;
- применение устройств (рис. 11) подавления газовых пульсаций в полостях трубопроводных и коробчатых элементов катколлектора (резонаторного типа, расширительных камер, шунтирующих перемычек), возбуждающих структурные колебания стенок корпусных коробчатых и трубопроводных элементов катколлектора, в том числе и с включением активных сопротивлений типа перфорированных перегородок и/или пористых вставок из материалов типа «сойферит»;
- использование промежуточных виброизолирующих элементов типа сильфонных компенсаторов колебаний (рис. 11), монтируемых между головкой блока цилиндров (ГБЦ) и модулем катколлектора для ослабления подводимого механического вибрационного возбуждения (и как следствие – уменьшения звукового излучения) структур стенок катколлектора.
- применение внешних, интегрированных с катколлектором дополнительных шумо-термоизолирующих кожухов (акустических капсул), охватывающих его наиболее шумоактивные и термо-нагруженные элементы;
- применение внешних автономных термо-акустических, аэроакустических экранных элементов, зазорно смонтированных относительно корпусных поверхностей шумоактивных и термонагруженных зон катколлектора;
- использование частотно-настроенных автономных объемных (полых резонаторных, или с набивкой ЗПМ, типа «сойферит») поглотителей



шума, излучаемого стенками корпуса катколлектора в подкапотное пространство моторного отсека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крючков А.Н. Математическое моделирование пульсаций давления и шума ручного механизированного пневмоинструмента // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2006. №1. С. 146-153.
2. Моделирование характеристик гасителей колебаний давления с учетом распределенности их параметров / С.К. Бочкарев, Г.М. Макарьяни, А.Б. Прокофьев, Е.В. Шахматов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2007. № 1. С. 148-155.
3. Влияние динамических характеристик присоединенных гидравлических цепей на вибрационные характеристики трубопроводов / Е.В. Шахматов, А.Б. Прокофьев, Г.М. Макарьяни // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2004. № 1. С. 96-101.
4. Шахматов Е.В., Прокофьев А.Б. Виброакустическая модель прямолинейного неоднородного трубопровода при его силовом возбуждении пульсациями рабочей жидкости // Известия Самарского научного центра РАН. 2000. Т. 2. № 1. С. 135-140.
5. Исследование собственных частот и форм колебаний воздушного объема реверберационной камеры / Г.М. Макарьяни, А.Б. Прокофьев, А.А. Иголкин, А.Н. Крючков // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» 26-27 июня 2003 г. Тезисы докладов, II часть. Самара: СГАУ, 2003. С. 127-128.
6. Модальный анализ приборной панели космического аппарата / А.И. Сафин, Г.М. Макарьяни, В.Н. Вякин, А.А. Иголкин, А.Н. Крючков // Региональная научно-практическая конференция, посвященная 50-летию первого полета человека в космос. Самара, 14-15 апреля 2011 г.: тезисы докладов. Самара: СГАУ, 2011. С. 106-108.
7. Johansmann M. and Sauer J. A new tool for three-dimensional non-contact vibration measurement in automotive applications // SAE Paper No. 2005-26-052, 2005.
8. Fritzsche M., Schell J., Frank S. and Johansmann M. A new method for measurement of rotating objects utilizing laser Doppler vibrometry combined with an optical derotator // Proceedings of the 17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 17), Cairo, Egypt, 18th July 2010.

Рис. 11. Варианты конструкций катколлекторов с пониженной виброшумовой активностью

EXPERIMENTAL RESULTS OF INVESTIGATION OF VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS COLLECTORS EXHAUST SYSTEM CAR ENGINES

© 2011 M.I. Fesina¹, A.N. Kryuchkov², G.M. Makaryants³, I.V. Malkin¹

¹ Tolgiatti State University ² Institute of Acoustic Machines, Samara

³ Samara State Aerospace University

The article addresses the issues of increased noise emanating of passenger car exhaust system catalyts. It shows their significant contribution to the external and internal noises of a vehicle which seriously deteriorates the vehicle performance and image features. It presents the results of the Russian-make catalyts modal investigation with the help of 3D scanning vibrometer. It's been noted an increased density of the catalyts's own frequencies in the frequency range of its increased acoustic activity. Measures have been offered to improve acoustic characteristics of the catalyts.

Keywords: noise muffler, the car, a piston internal combustion engine, exhaust system, a catalytic collector

Michael Fesina, Candidate of Technics, Associate Professor at the Steering of Industrial and Ecological Safety Department. E-mail: michailfes@yandex.ru

Alexander Kruchkov, Doctor of Technics, Executive Director. E-mail: kan@ssau.ru

Georgy Makaryants, Candidate of Technics, Associate Professor at the Automatic System of the Power Plant Department. E-mail: mak-georgy@yandex.ru.ru

Ilya Malkin, Post-Graduate Student at the Steering of Industrial and Ecological Safety Department.

E-mail: malkini@rambler.ru