

УДК 628.517.2

ПОДАВЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ШУМА ВЫХЛОПНОЙ СИСТЕМЫ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Макарьянц Г. М.,
Крючков К. А.,
Сафин А. И.,
Крючков А. Н.

Самарский государственный
аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский
университет) (СГАУ)
443086, Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34
georgy.makaryants@gmail.com

Фесина М. И.,
Малкин И. В.

Тольяттинский государственный
университет
г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
Российская Федерация
445667
malkiniv@rambler.ru

Исследован высокочастотный шум каталитического коллектора выхлопной системы легкового автомобиля. Анализ показал, что источником шума является вибрация каталитического коллектора выхлопной системы двигателя. Для определения причин повышенного шумоизлучения коллектора создана стендовая установка на которой исследован акустический и вибрационный отклик коллектора на широкополосное динамическое возбуждение. Определён спектр акустической мощности шума, излучаемого коллектором и распределение виброскорости по его поверхности. Обнаружено, что в диапазоне частот от 2,5 до 4,0 кГц поверхность каталитического коллектора обладает высокой акустической проводимостью. Была разработана конструкция демпфера вибрации поверхности коллектора из материал МР. Основным его преимуществом является сохранение работоспособности в условиях высоких температур, наблюдаемых на выходе из двигателя. Использование демпфера позволило снизить структурный шум, излучаемый каталитическим коллектором.

Ключевые слова: каталитический коллектор; структурный шум; автомобиль; акустическая мощность; акустическая проводимость; металло-резина

1 Введение

Одним из дорогостоящих элементов системы выпуска отработавших газов легкового автомобиля является каталитический коллектор. Каталитический коллектор устанавливается сразу на выходе из двигателя (рисунок 1).

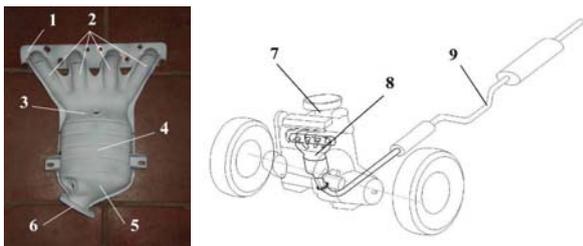


Рисунок 1. Каталитический коллектор и его размещение в выхлопной системе:

- 1 – фланец входных патрубков, 2 – входные патрубки,
3 – входной газоприёмник, 4 – каталитический блок,
5 – выходной газоприёмник (газосмесительная камера),
6 – фланец выходного патрубка, 7 – ДВС, 8 – коллектор,
9 – тракт выпуска отработавших газов

Каталитический коллектор выполняет две функции. Первая - коммутация патрубков выхлопа двигателя с трактом выпуска отрабо-

тавших газов. Вторая - снижения выброса вредных веществ в атмосферу.

Коллектор содержит разветвлённый прочный трубопровод, составленный из отдельных патрубков (см. рисунок 1). Число патрубков соответствует числу цилиндров двигателя. Одним концом при помощи фланца они прикреплены к корпусу двигателя. Другим концом они сходятся в общей диффузорно образованной газоприёмной камере. Эта камера соединяется с корпусом. Его боковые стенки при помощи термоизолирующей прокладки соединены с блоком каталитического носителя (рисунок 2). Каталитический носитель представляет собой газопроницаемую пористую структуру. На выходе корпуса коллектора расположена конфузорно образованная газосмесительная камера. Её выходной конец при помощи фланца крепится к тракту выпуска отработавших газов. Для защиты агрегатов моторного отсека от повышенной температуры поверхности корпуса каталитического коллектора используется термозщитный экран. Для снижения себестоимости производства

каталитического коллектора была разработана новая технология его изготовления. Дорогостоящая операция литья корпуса коллектора, газоприёмной и газосмесительной камеры была заменена на более дешёвую штамповку этих элементов с последующей их сваркой.

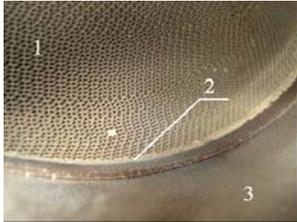


Рисунок 2. Вид каталитического блока катализатора:
1 – каталитический носитель, 2 – уплотняющая термоизолирующая прокладка, 3 – корпус каталитического блока

В ходе акустических испытаний легкового автомобиля с установленным каталитическим коллектором новой конструкции было отмечено повышение уровня шума на всех режимах работы двигателя. Как показали предварительные экспериментальные исследования шума в моторном отсеке, внутри салона и снаружи автомобиля в частотном диапазоне от 2,5 до 4,0 кГц наблюдается усиление шума независимо от режима работы двигателя (рисунки 3 и 4).



Рисунок 3. Третьоктавный спектр уровней звука при частоте вращения коленчатого вала 3800 об/мин в подкапотном пространстве моторного отсека

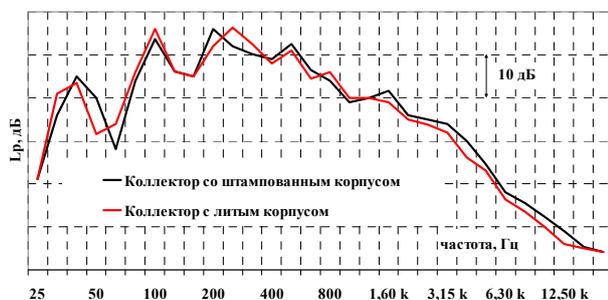


Рисунок 4. Третьоктавный спектр уровней звука при частоте вращения коленчатого вала 3300 об/мин в пассажирском салоне автомобиля в зоне правого уха водителя

Усиление шума в указанном диапазоне имеет резонансный характер и предположительно связано со слабой звукоизоляцией тонкостенного штампованного корпуса на собственных частотах колебаний его поверхности.

2 Анализ экспериментальных виброакустических характеристик каталитического коллектора

Вопросы исследования модальных характеристик системы выпуска отработавших газов рассмотрены в работах многих авторов [1-4]. Основной задачей этих работ было снижение резонансных колебаний, возникающих под действием динамического возбуждения, оказываемого со стороны дороги и двигателя. Поэтому модальные характеристики определялись в диапазоне частот до 200 Гц. При этом каталитический коллектор был исключён из рассмотрения.

В связи с этим исследование динамических характеристик каталитического коллектора в высокочастотной области представляет актуальную задачу.

Для уточнения акустических характеристик каталитического коллектора как источника звука были выполнены замеры его звуковой мощности при работающем двигателе. При этом использовался интенсиметр G.R.A.S. Intensity Probe type 50AI-B. Акустическая мощность определялась по ISO 9614 на сетке 5x5 с размером ячейки 0.08 м. Анализ полученных результатов показал, что в частотном диапазоне от 2,5 до 4,0 кГц наблюдается усиление звука (рисунок 5).

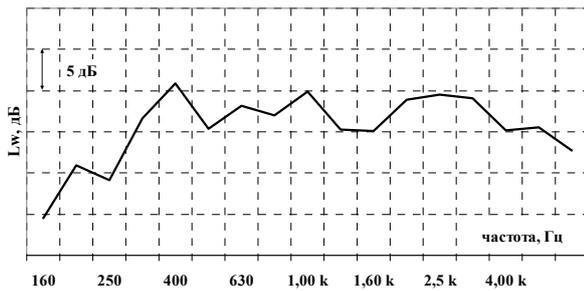


Рисунок 5. Спектр звуковой мощности каталитического коллектора при частоте вращения коленчатого вала 3300 об/мин

Это хорошо коррелирует с данными предварительных исследований и подтверждает, что причиной повышенного шума на этих частотах является именно звукоизлучение каталитического коллектора.

Как отмечалось выше на частотах от 2,5 до 4,0 кГц предположительно наблюдался структурный шум, генерируемый поверхностью каталитического коллектора. Для подтверждения этого факта было выполнено исследование вибрации его поверхности. Поскольку структурный шум вызывает вибрация объекта на частотах, соответствующих мембранным формам колебаний, то на следующем этапе исследовался отклик поверхности каталитического коллектора на широкополосное динамическое возбуждение в частотном диапазоне от 5 до 5 000 Гц. Как известно наибольшую точность в определении мембранных форм дают бесконтактные методы виброметрирования. В проведённых исследованиях использовался трёхкомпонентный сканирующий лазерный виброметр Polytec PSV-400-3D (рисунок 6).



Рисунок 6. Сканирующий лазерный виброметр Polytec PSV-400-3D

Ввиду сложности измерения вибрации поверхности каталитического коллектора в стеснённых условиях моторного отсека исследования проводились на так называемой "холодной" установке (рисунок 7). Каталитический коллектор закреплялся на автомобильном двигателе, который в свою очередь через штатные виброизолирующие опоры устанавливался на несущей раме. Динамическое возбуждение создавалось при помощи виброшейкера "LMS-Qsources Integrated miniature shaker", установленного на головке блока цилиндров (рисунок 8). Тип сигнала возбуждения - periodic chirp.



Рисунок 7. Экспериментальная установка по модальному анализу каталитического коллектора



Рисунок 8. Закрепление вибровозбудителя в ходе модального анализа

На рисунке 9 представлен спектр усреднённой по поверхности амплитуды виброскорости. При этом каждой резонансной частоте (или группе частот) поставлены в соответствие формы колебаний конструкции коллек-

тора. Полученные формы колебаний коллектора можно подразделить на балочные формы (рисунки 10 и 11) на низких частотах (50-1000 Гц), мембранные формы колебаний термоэкрана (рисунок 12) на средних и высоких частотах (1,5-2,5 кГц), а также формы, когда на резонансные колебания (рисунок 13) термоэкрана оказывают влияние собственные формы других элементов конструкции, как например приемные трубы газоприемника (2,5-4,0 кГц).

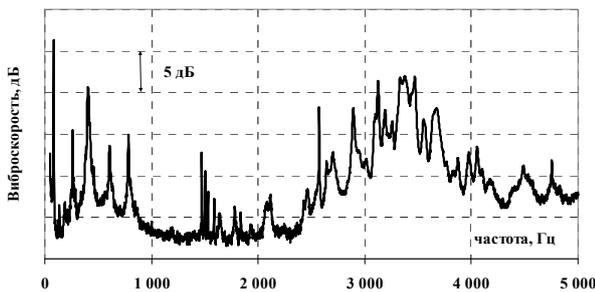


Рисунок 9. Спектр усреднённой по поверхности каталитического коллектора виброскорости. Отклик на широкополосное возбуждение

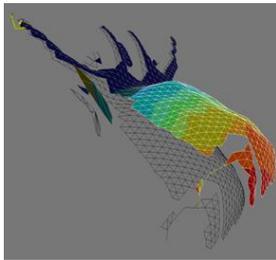


Рисунок 10. Собственная форма колебаний коллектора (81,3 Гц)

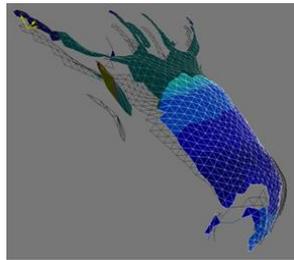


Рисунок 11. Собственная форма колебаний коллектора (607,8 Гц)

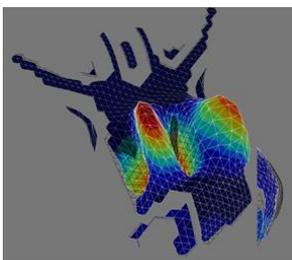


Рисунок 12. Собственная форма колебаний коллектора (2573,4 Гц)

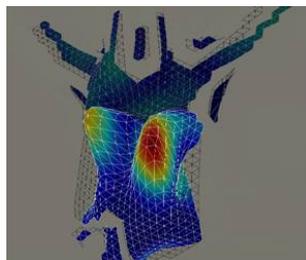


Рисунок 13. Собственная форма колебаний коллектора (3333,0 Гц)

Анализ полученного спектра виброскорости поверхности каталитического коллектора показал высокую плотность расположения собственных мембранных форм колебаний

высокой амплитуды в диапазоне от 2,5 до 4,0 кГц. Усиление мембранных частот в этом диапазоне связано с совпадением изгибных резонансов патрубков каталитического коллектора с резонансами термоэкрана корпуса.

3 Мероприятия по снижению шума каталитического коллектора

Для снижения высокочастотного шума коллектора было изготовлено несколько вариантов конструкции его корпуса. Однако ни один из них не позволил значительно повлиять на частотную отстройку патрубков каталитического коллектора и термоэкрана с целью ослабления их взаимного усиления. Поэтому была разработана конструкция демпфирующей прокладки (рисунок 14), основная задача которой заключалась в уменьшении амплитуды вибрации поверхности корпуса каталитического коллектора. Конструкция прокладки представляет собой уложенную в виде брикета прямоугольной формы спрессованную витую проволоку. Такой материал имеет название металлорезина (МР) [5, 6]. Он широко используется для демпфирования вибрации высокотемпературных объектов.



Рисунок 14. Конструкция вибродемпфирующей прокладки:

1 – термоэкран, 2 – вибродемпфирующая прокладка (по всей поверхности под термоэкраном)

4 Результаты внедрения мероприятий по снижению шума каталитического коллектора

Проведено сравнение виброакустических характеристик начальной конструкции каталитического коллектора и конструкции с вибродемпфером из МР. Для этого использовалась разница спектров виброскорости, усреднённых по всей

поверхности коллектора. Результаты представлены на рисунке 15.

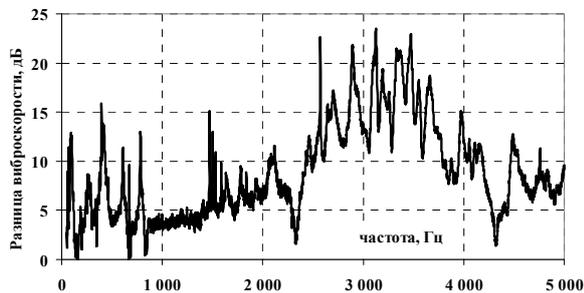


Рисунок 15. Эффективность снижения вибрации с помощью вибродемпфера из МР

Применение вибродемпфера позволило снизить вибрацию в частотном диапазоне от 2,5 до 4,0 кГц более чем на 20 дБ. Уровень шума снизился на 4,1 дБА. Как видно из рисунка 16 снижение шума произошло именно за счёт подавления высокочастотной резонансной вибрации в диапазоне от 2,5 до 4,0 кГц.

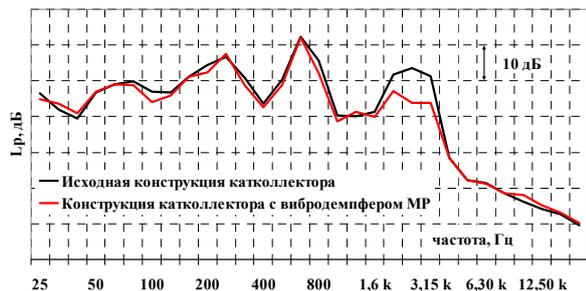


Рисунок 16. Сравнение шума исходной конструкции и конструкции с вибродемпфером из МР

5 Заключение

Исследована проблема повышенного шума выхлопной системы автомобиля в области высоких частот. Показано, что его причиной является резонансная вибрация поверхности каталитического коллектора. Исследование вибрационного отклика поверхности коллектора на динамическое возбуждение проводилось с помощью трёхкомпонентного сканирующего лазерного виброметра. Было обнаружено усиление мембранных форм колебаний термоэкрана резонансом труб газоприёмника в области от 2,5 до 4,0 кГц. Для снижения амплитуды резонансной вибрации был разработан вибродемпфер. Он представляет собой прокладку прямоугольной формы из материала

МР, уложенную между корпусом коллектора и термоэкраном. Внедрение вибродемпфирующей прокладки позволило снизить вибрацию в среднем на 20 дБ в частотном диапазоне от 2,5 до 4,0 кГц. Уровень шума при этом снизился на 4,1 дБА до приемлемого уровня. Снижение шума произошло именно за счёт подавления высокочастотной резонансной вибрации в диапазоне от 2,5 до 4,0 кГц. Таким образом, можно заключить, что применение демпфера позволило снизить вибрацию корпуса каталитического коллектора на резонансных частотах и решить проблему его повышенного высокочастотного шумоизлучения.

Работа выполнена при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

Список использованных источников

- [1] Viswanathan, A., Perumal, E. (2009) Deciding isolator and mounting points of a truck's exhaust system based on numerical and experimental modal analysis. Paper presented at the *Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration*. Krakow, Poland, 5–9 July, 2009. 1 pp. 430-437. Available from http://www.iiav.org/archives_icsv/2009_icsv16/content/technical_papers/94.pdf
- [2] Verboven, P., Valgaeren, R., Van Overmeire, M., & Guillaume, P. (1998) Some comments on modal analysis applied to an automotive exhaust system. Paper presented at the *Proceedings of the International Modal Analysis Conference - IMAC*, 2 pp 987-993. Available from <http://sem-proceedings.com/16i/sem.org-IMAC-XVI-16th-Int-162802-Some-Comments-Modal-Analysis-Applied-Automotive-Exhaust-System.pdf>
- [3] Belingardi, G., & Leonti, S. (1987) Modal analysis in the design of an automotive exhaust pipe. *International Journal of Vehicle Design*, 8(4-6), 475-484.
- [4] Englund, T. (2003) Dynamic characteristics of automobile exhaust system components. *Licentiate thesis. Department of Mechanical Engineering, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden*. 111 p. Available from [http://www.bth.se/fou/forskinforsejnsf/all/de13c6b01112f0ebc1256fce003347f2/\\$file/Lic_englund.pdf](http://www.bth.se/fou/forskinforsejnsf/all/de13c6b01112f0ebc1256fce003347f2/$file/Lic_englund.pdf)
- [5] Igolkin, A.A., Izzheurov, E.A., Hongyuan, J. & Shakhmatov, E.V. (2011) Acoustic performances of metal

rubber. Paper presented at the Proceedings of the 18th International Congress on Sound and Vibration. Rio de Janeiro, Brazil, 10–14 July, 2011. 1 pp. 819-825.

Available from

http://www.iiav.org/archives_icsv/2011_icsv18/Papers/StructuredSessions/S13_Igolkin.pdf

[6] Khaletskiy, Y., Igolkin, A., Pochkin, Y. (2013)

Acoustic response of a fan duct liner including porous ma-

terial. Paper presented at the Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration. Rio de Janeiro, Brazil, 7–11 July, 2013. 1 pp. 341-348.

Available from

http://www.iiav.org/archives_icsv/2013_icsv20/content/papers/papers/full_paper_109_20130327134749512.pdf

Makaryants G. M.,

Kruchkov K. A.,

Safin A. I.,

Kruchkov A. N.

Samara State Aerospace University
(SSAU)

34, Moskovskoye shosse, Samara,
443086, Russia

georgy.makaryants@gmail.com

Fesina M. I.,

Malkin I. V.

Togliatti State University,
14, Belorusskaya, Togliatti

445667, Russia

malkiniv@rambler.ru

HIGH FREQUENCY NOISE SUPPRESSION OF THE AUTOMOBILE EXHAUST SYSTEM

The paper presents the decision for the question of the excessive catalytic collector high frequency noise in the automobile engine exhaust system. The high level noise has been observed under the idle state engine condition. In order to understand the causes of the high catalytic collector noise emission the research of its vibroacoustic internals has been performed. An experimental stand for the acoustic and vibration response on broadband dynamic excitation tests has been created. The power of the acoustic noise, emitted by the catalytic collector and vibration distribution of its surface have been defined. It was found that the catalytic collector surface has the low acoustic impedance in the high frequency range. The surface vibration damper design has been developed. A special material, so called metal rubber, has been used to damp the vibration. The main advantage of this material is the temperature tolerance, quite useful for the engine exhaust system unit. The use of the damper has allowed to reduce the structure-born noise of the catalytic collector.

Key words: catalytic collector; structure-born noise; automobile; acoustic power; acoustic impedance; metal rubber