

УДК: 629.017:629.018

OECD: 629.017:629.018

Прогнозирование качественного изменения виброакустических характеристик автотранспортного средства

Рахматов Р.И.^{1,2}¹Главный специалист, к.т.н., ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия²С.н.с, к.т.н., ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

Аннотация

В статье приводится подход к прогнозированию качественного изменения виброакустических характеристик автотранспортного средства (АТС), при использовании динамического абсорбера с эффектом акустических черных дыр (ДА АЧД) и метаматериалов. В рамках работы использован ДА АЧД с заданными характеристиками и определены места установки ДА АЧД для получения максимального эффекта (максимального снижения шума внутри АТС). Места установки ДА АЧД определены по результатам анализа функций передачи шума (ФППШ) и анализа полей упругих деформаций на частоте, соответствующей максимальным значениям амплитуд ФППШ на зеленом кузове (АТС без неподрессоренной массы). Модель зеленого кузова (конечно-элементная модель) валидирована по массе, составу, критериям достоверности модальных форм и частотного отклика (локальной динамической жесткости и функции передачи шума). Для уменьшения колебаний в самой ДА АЧД и дополнительного поглощения колебательной энергии (преобразование колебательной энергии в тепло) внешняя кромка торца ДА АЧД оклеена вибродемпфирующим материалом, характеристики которого определены экспериментально. Также, для прогнозирования качественного изменения виброакустических характеристик АТС используются предполагаемые структурные характеристики метаматериала, разработка которого ведется в рамках научного проекта № 23-19-00258 гранта Российского научного фонда. Для этого, стальные панели пола заменены на панели пола из метаматериала с предполагаемыми структурными характеристиками и проведена оценка виброакустических (ВА) характеристик по критерию ФППШ. Одновременно с вышеизложенным, с целью уменьшения излучения колебательной энергии во внутреннее пространство АТС проведена топографическая оптимизация задней панели пола. Для оценки эффективности каждого технического решения проведен сравнительный анализ по критерию ФППШ.

Ключевые слова: транспортно-технологические средства и комплексы, структурные исследования, виброакустические исследования, валидация, критерий достоверности модальных форм, акустическая черная дыра, метаматериалы, сравнительный анализ, ФППШ.

Prediction of qualitative changes in NVH characteristics of motor vehicles

Rakhmatov R.I.^{1,2}¹Chief specialist, 'FSUE NAMF', Moscow, Russia²Senior researcher, Ph.D., Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract

The article deals with an approach to forecasting of qualitative change in vehicle vibroacoustic characteristics (NVH) when using an acoustic black hole (effect) dynamic absorber (ABH DA) and metamaterials. Within the work, an ABH DA with assigned characteristics was used and ABH DA installation places were specified in order to achieve the maximum effect (maximum noise decrease inside the vehicle). The ABH DA installation places have been determined following the results of the noise

transfer functions (NTF) analysis and elastic deformation fields analysis at a frequency corresponding to the maximum values of the NTF amplitudes on a green body (vehicle without the unsprung mass). The green body model (finite element model) has been validated in terms of the mass, composition, criteria of reliability of modal shapes and frequency response (local dynamic stiffness and noise transfer function). To decrease oscillations in the ABH DA itself and to additionally absorb the vibrational energy (transform the vibrational energy into heat), the outer edge of the ABH DA end face is covered with an adhesive vibration cushioning material, the characteristics of which were determined experimentally. Also, in order to forecast the qualitative change in the vehicle NVH, the assumed structural characteristics of the metamaterial are used, the development of which is being carried out within scientific project No. 23-19-00258 with a grant of the Russian Science Foundation. For this, the steel floor panels were replaced with the floor panels made of the metamaterial with the assumed structural characteristics, and the NVH was assessed according to the NTF criterion. Along with the above, topographical optimization of the rear floor panel was performed in order to decrease the vibrational energy emission into the vehicle internal space. In order to assess the efficiency of each technical solution, comparative analysis in terms of the NTF criterion was performed.

Keywords: transport and technological vehicles, appliances and facilities, structural research, vibroacoustic studies, NVH research, validation, criterion of reliability of modal shapes, acoustic black hole, metamaterials, comparative analysis, noise transfer function (NTF).

Введение

Прогнозирование качественного изменения виброакустических характеристик автотранспортного средства, и разработка контрмер является основной задачей отделов виброакустики и потребительских свойств автомобильного предприятия. При этом контроль и при необходимости улучшения виброакустических характеристик АТС необходимо выполнять на начальных этапах разработки, так как разработка и применение технических решений по уменьшению шума и вибрации на поздних этапах требуют значительных дополнительных временных и финансовых затрат, а на этапе массового производства зачастую невозможны. Одной из составляющих общего уровня внутреннего шума АТС является шум, возникающий в процессе вибраций конструкции кузова и навесных узлов АТС или структурный шум. Как известно в частотном диапазоне 1-150 Гц энергия упругих волн имеет максимальные значения, поэтому для прогнозирования низкочастотного структурного шума при использовании ДА АЧД и метаматериалов разработан соответствующий подход.

1. Идентификация проблемных частот и мест установки ДА АЧД

Идентификация проблемных частот и/или частотных диапазонов основывается на анализе ФПШ (функция зависимости звукового давления от входной динамической нагрузки выражена через Па/Н). ФПШ рассчитана на валидированной модели [1], иллюстрация которой приведена на рисунке 1.

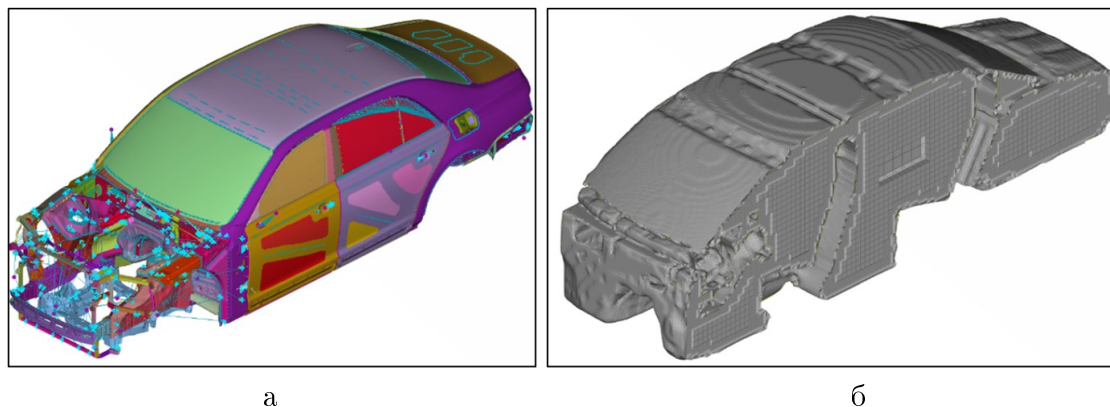


Рис. 1. КЭМ зеленого кузова для исследований ФПШ: а – структурная и б – внутренний акустический воздушный объем

Исследования проводились при воздействии гармонической единичной силе амплитудой 1 Н на зоны крепления основных и вторичных источников динамического возбуждения зеленого кузова (силовой агрегат, направляющий аппарат подвески, трансмиссия, система выпуска отработавших газов и др.), а отклик зафиксирован микрофонами, расположенными внутри зеленого кузова согласно [2-3]. Иллюстрация зон приложения сил приведена на рисунке 2.



Рис. 2. Места приложения сил в КЭМ зеленого кузова для исследования ФПШ

Результаты расчетных исследований ФПШ в виде водопадного графика при динамическом воздействии на зоны крепления передней подвески приведены на рисунке 3 (отклик-левое ухо заднего правого пассажира). Соответственно, по оси абсцисс расположены частоты, по оси ординат зоны крепления передней подвески по трем поступательным степеням свободы, градация от красного до синего обозначает от максимальных значений амплитуды до 0 дБ ФПШ.

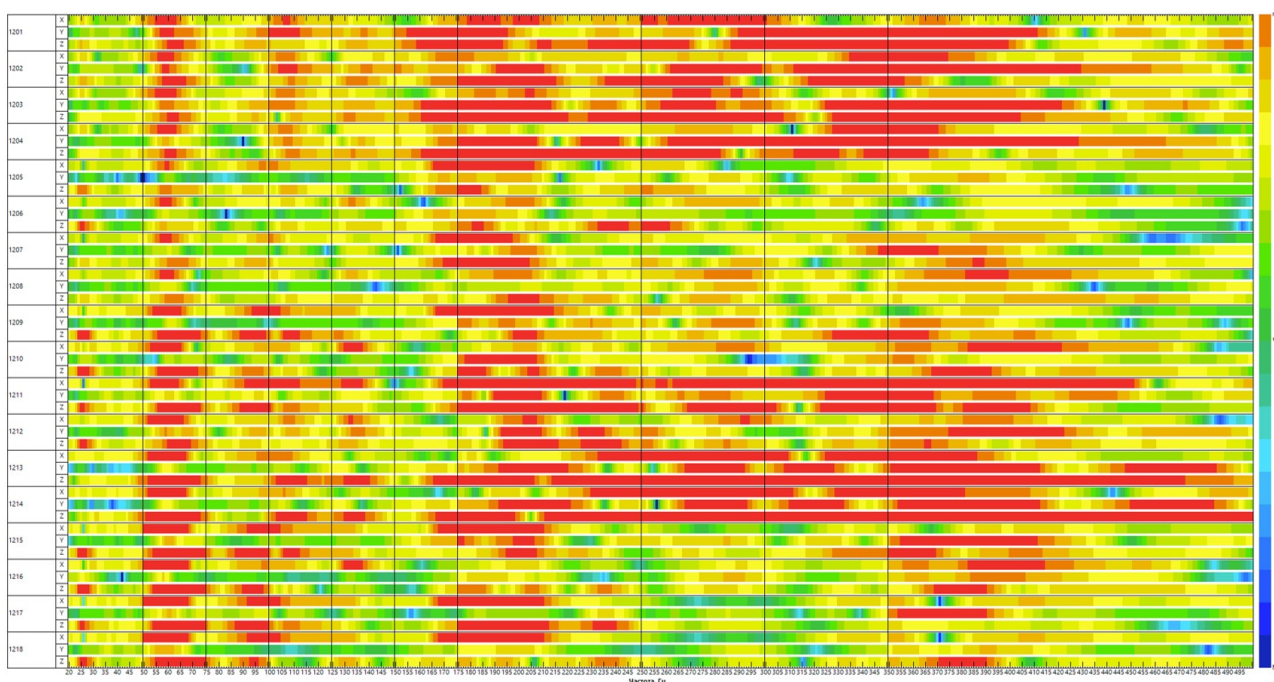


Рис. 3. Результат расчетных исследований ФПШ

Анализ ФПШ показал, что максимальные значения амплитуд зафиксированы при динамическом воздействии на опору карданного вала и на передние точки крепления заднего подрамника по вертикальному направлению. Иллюстрация вынужденных форм колебаний на максимальных амплитудах при динамическом воздействии на эти точки приведены на рисунке 4.

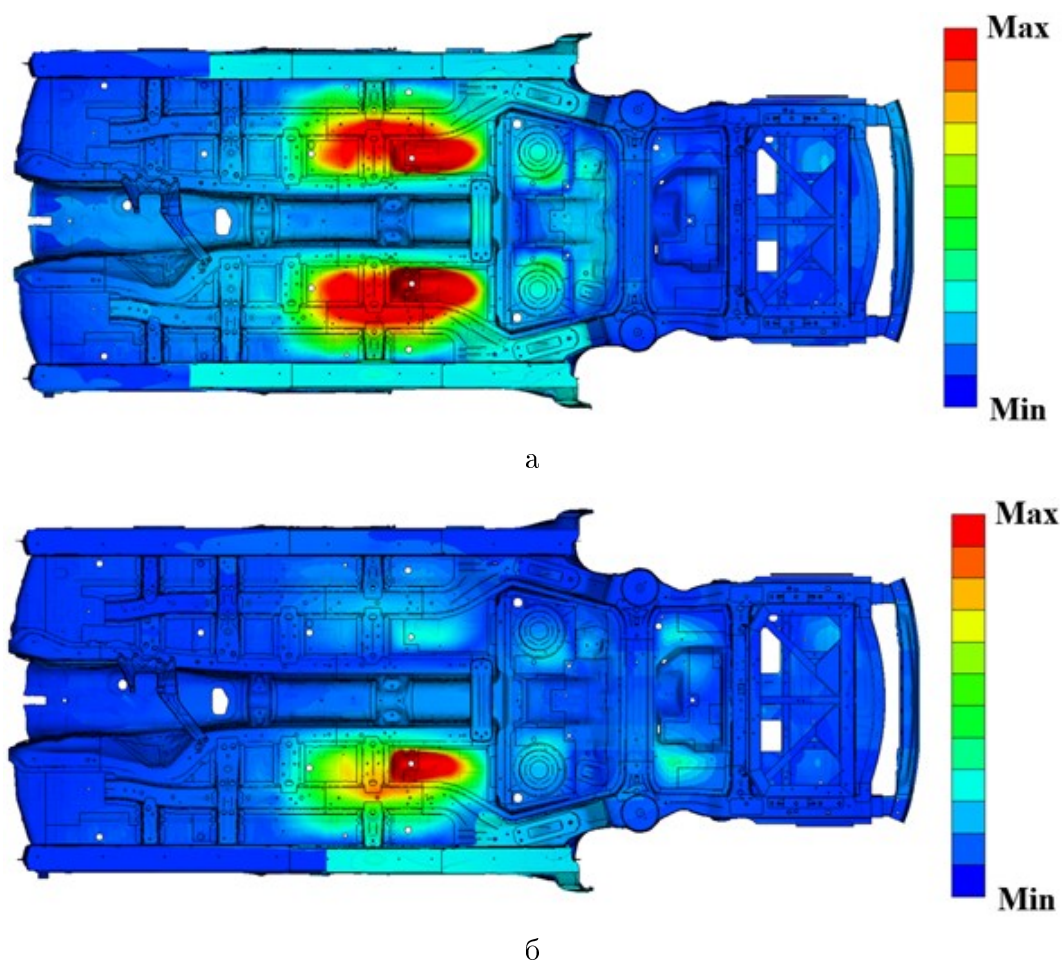


Рис. 4. Вынужденные формы колебания при динамическом воздействии: а – на опору карданного вала и б – на переднюю правую опору заднего подрамника

2. Идентификация проблемных частот и мест установки ДА АЧД

Анализ вынужденных форм колебаний и анализ вкладов панелей на ФПШ показал, что основными излучающими поверхностями являются панели «среднего» пола в районе ног задних пассажиров. Соответственно, оптимальные места установки ДА АЧД являются места пучности (максимальные виброперемещения) определенных при анализе вынужденных форм колебаний, при этом анализ компоновочных ограничений указывает, что классическая конструкция ДА АЧД не пригодна для рассматриваемой конструкции. В связи с вышеизложенным, разработана ДА АЧД тарельчатого типа, схема которой приведена на рисунке 5.

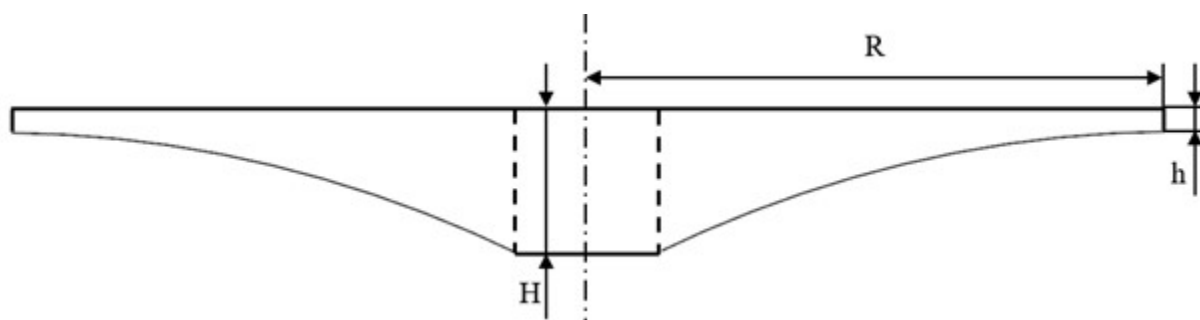


Рис. 5. Схема ДА АЧД для АТС

ДА АЧД состоит из центрального цилиндра, изменения толщины цилиндра вдоль радиального направления соответствует степенному закону. Максимальный диаметр и максимальная высота ограничена компоновкой дна АТС и взаимосвязаны между собой [4-6].

На основе оптимизационных работ с учетом компоновочных ограничений, выбран материал ДА АЧД и габаритные характеристики, при этом первая частота собственных колебаний конструкции настроена на частоту соответствующей частоте максимальной амплитуды ФПШ. Иллюстрация ДА АЧД в составе зеленого кузова (АТС без неподрессоренной массы) приведена на рисунке 6.

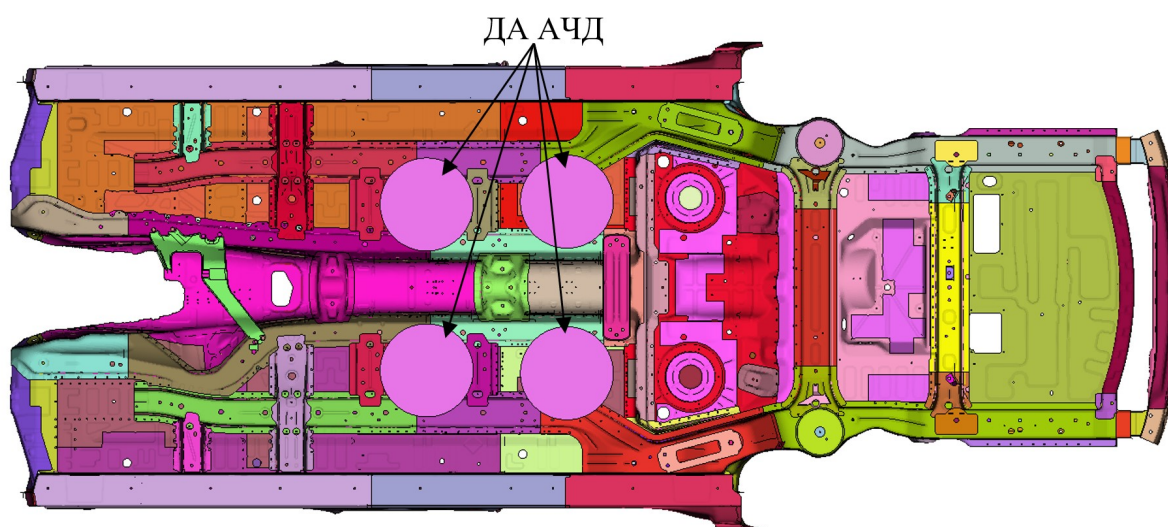
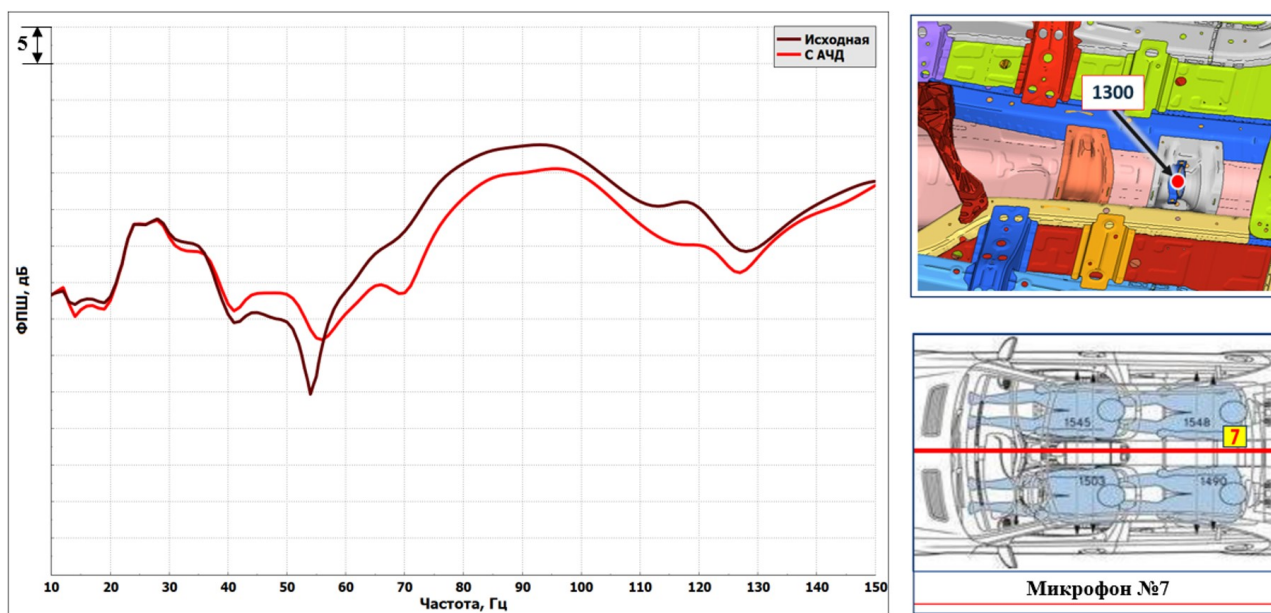
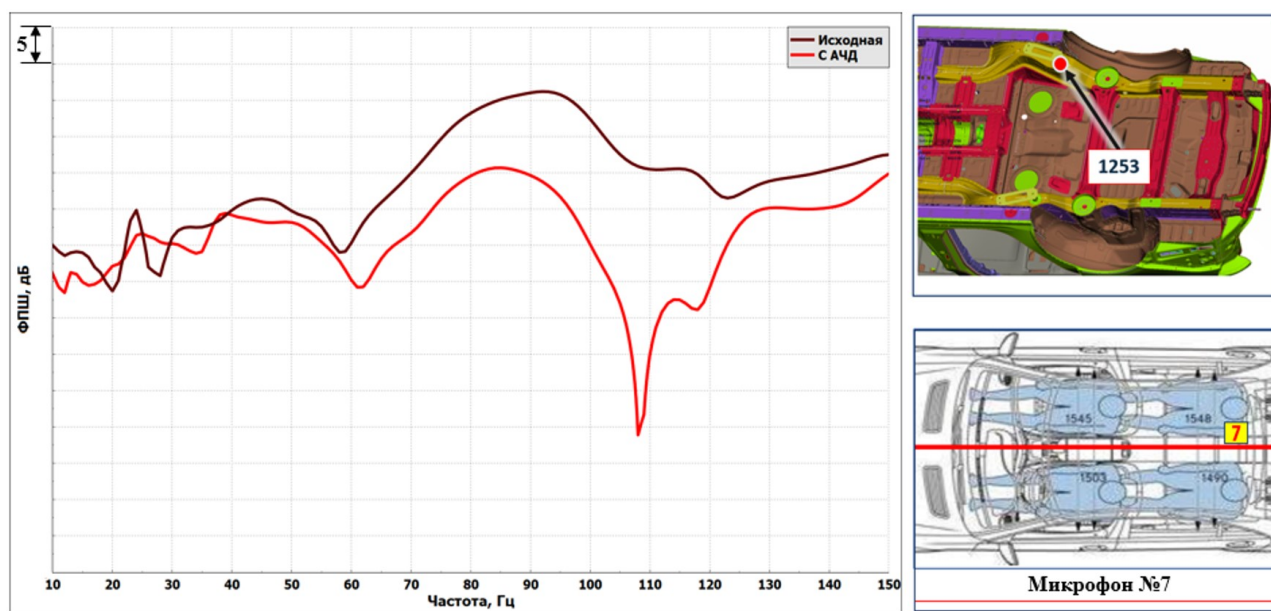


Рис. 6. ДА АЧД в составе зеленого кузова

Результаты сравнительных расчетов ФПШ, а именно исходной конструкции и конструкции с ДА АЧД при динамических воздействиях на опору карданного вала (точка 1300), переднюю левую опору заднего подрамника (точка 1253) приведены на рисунках 7(а) и 7(б) соответственно. При этом акустический отклик зафиксирован у левого уха заднего правого пассажира.



а



б

Рис. 7. Сравнительные графики ФПШ до и после установки ДА АЧД при приложении динамической нагрузки в: (а) точке крепления опоры карданного вала, по направлению Z и (б) левой передней точке крепления заднего подрамника, по направлению Z соответственно

Анализ результатов расчётных исследований показывает, что внедрение ДА АЧД позволило снизить ФПШ до 35 дБ. Иллюстрация вынужденных форм колебаний на частоте 86 Гц до и после установки ДА АЧД при динамическом воздействии на опору карданного вала приведены на рисунке 8(а) и 8(б) соответственно.

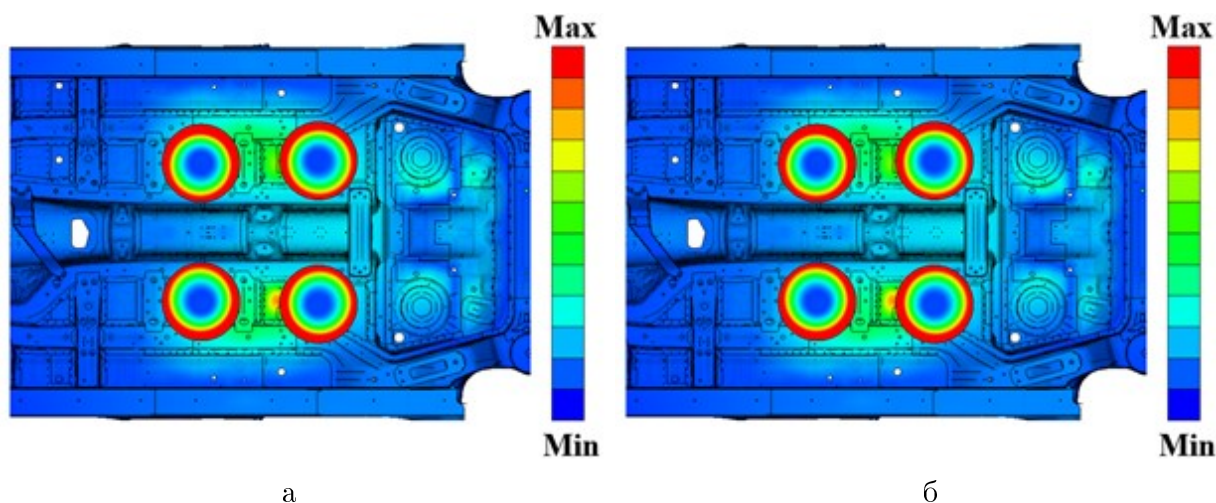


Рис. 8. Сравнительные формы вынужденных колебаний на частоте 86 Гц: а – исходное состояние и б – с установкой ДА АЧД

Анализ рисунка 8 показывает, что внедрение ДА АЧД позволило уменьшить колебания излучающей поверхности (панели под ногами задних пассажиров). А также произошло перераспределение колебательной энергии (максимальные амплитуды виброперемещений с панели пола переместились на внешнюю кромку ДА АЧД) и амплитуда максимальных виброперемещений уменьшилась.

Так как внешняя кромка ДА АЧД имеет максимальные амплитуды виброперемещений, для снижения амплитуд колебаний на внешнюю кромку конструкции ДА АЧД добавлены вибродемпфирующие материалы толщиной $h_0 = 5$ мм (рисунок 9). Характеристики вибродемпфирующего материала получены по результатам экспериментальных исследований [1].

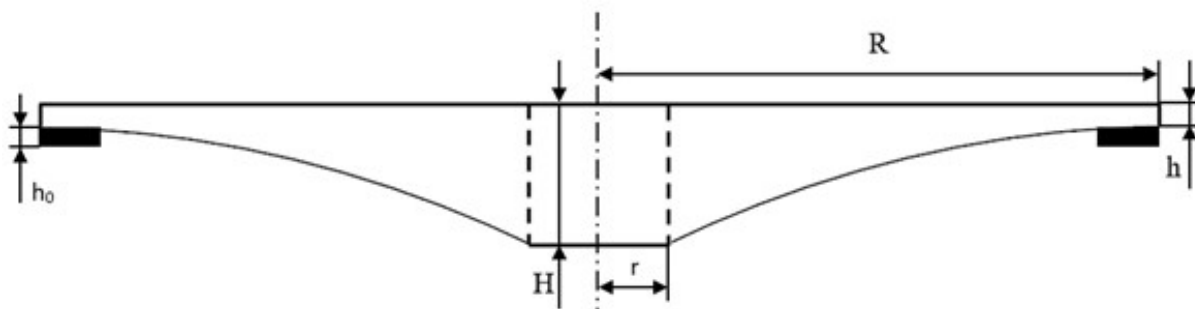


Рис. 9. Схема ДА АЧД с вибродемпфирующим материалом для АТС

Результаты сравнительных расчетных исследований ФПШ, а именно исходной конструкции, конструкции с ДА АЧД и конструкции с ДА АЧД и вибродемпфирующим материалом при динамических воздействиях на опору карданного вала (точка 1300), переднюю левую опору заднего подрамника (точка 1253) приведены на рисунках 10(а) и 10(б) соответственно. При этом акустический отклик также зафиксирован у левого уха заднего правого пассажира.

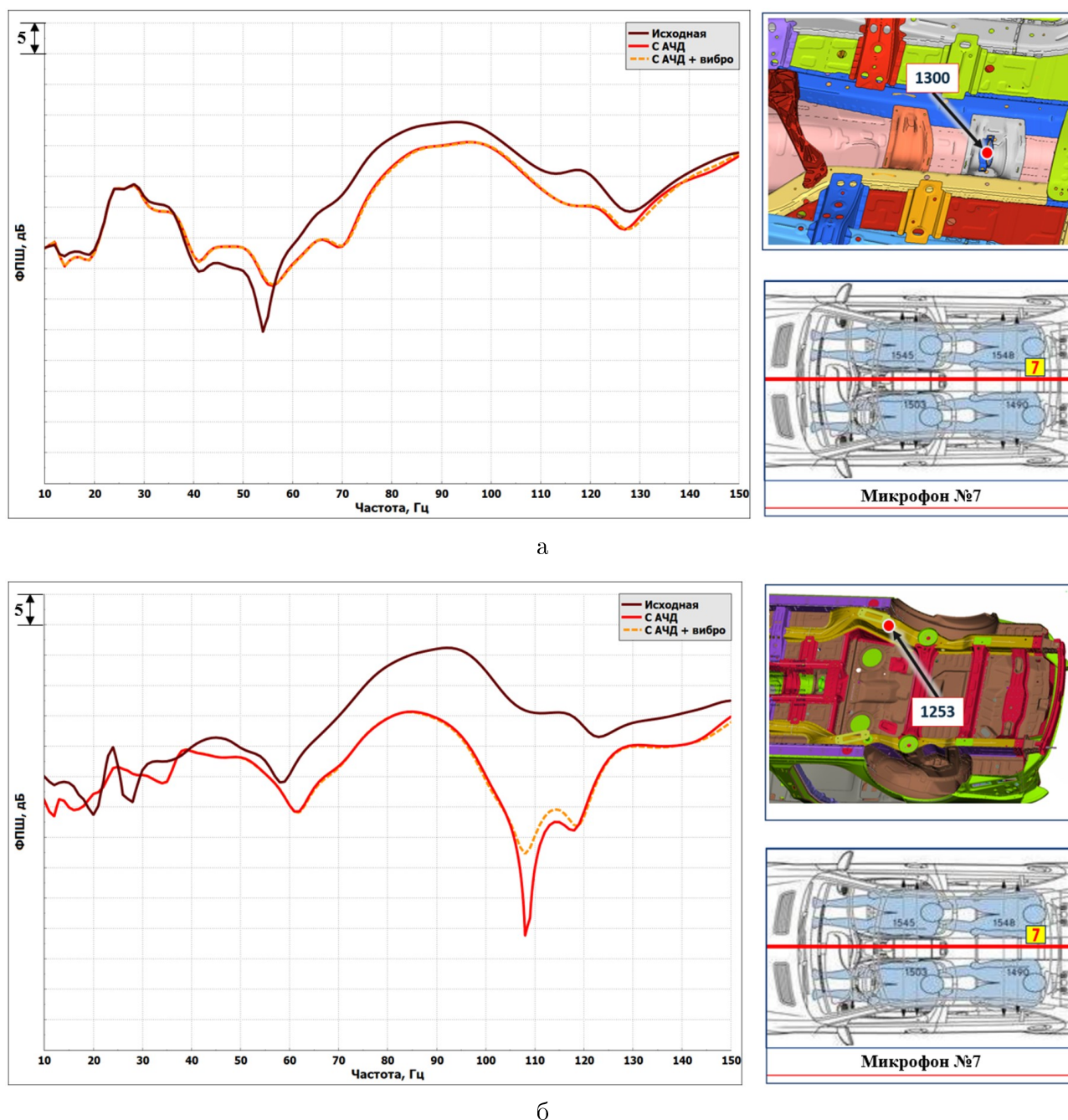


Рис. 10. Сравнительные графики ФПШ до и после установки ДА АЧД и ДА АЧД с вибродемпфирующим материалом при приложении динамической нагрузки в: а – точке крепления опоры карданного вала, по направлению Z и б – левой передней точке крепления заднего подрамника, по направлению Z соответственно

Анализ результатов расчётных исследований показывает, что внедрение вибродемпфирующего материала с толщиной $h_0 = 5$ мм в ДА АЧД не влияет на ФПШ (в пределах погрешности расчёта).

3. Прогнозирование качественного изменения виброакустических характеристик АТС при использовании метаматериалов

Для прогнозирования качественного изменения виброакустических характеристик АТС используется метаматериал, разработка которого ведётся в рамках научного

проекта № 23-19-00258 гранта Российского научного фонда. Соответственно, материалы панелей пола исходной конструкции зеленого кузова заменены на метаматериал с предполагаемыми структурными характеристиками и проведена оценка ВА по критерию ФПШ. Следует отметить, что метаструктура – система (например, строение, внутренняя организация композитной конструкции), обладающая одновременно одним или несколькими свойствами метаматериалов, составляющих её. В свою очередь, метаматериал – тип искусственно полученного композитного материала, спроектированного так, чтобы получить свойства, которыми не обладают природные материалы (из которых состоит метаматериал) [7-9].

Один из многочисленных вариантов метаматериала представляет из себя многослойный композитный материал, схема укладки волокон которого приведена на рисунке 11.

Схема укладки волокон метаматериала				
№ слоя	50/40/10	25/50/25	50/30/20	45/40/15
1	45	45	45	45
2	-45	90	-45	-45
3	90	-45	90	90
4	0	0	0	0
5	0	45	0	0
6	45	45	45	45
7	90	-45	90	90
...				
40	45	45	45	45

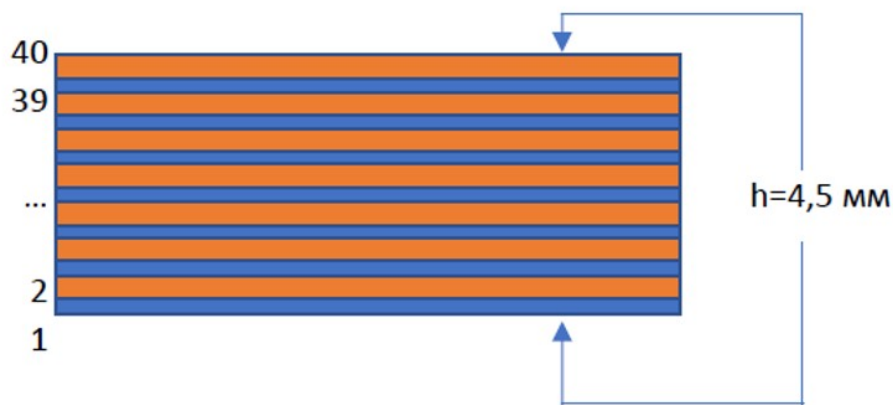


Рис. 11. Схема укладки метаматериала

Метаматериал состоит из 40 слоев, и суммарная толщина составляет 4,5 мм.

С целью уменьшения излучения колебательной энергии во внутреннее пространство АТС проведена топографическая оптимизация задней панели пола. Целевая функция топографической оптимизации: увеличения жесткости и уменьшения виброскорости излучающей поверхности. Результат топографической оптимизации, а именно положения и глубина штамповок на панели приведены на рисунке 12.

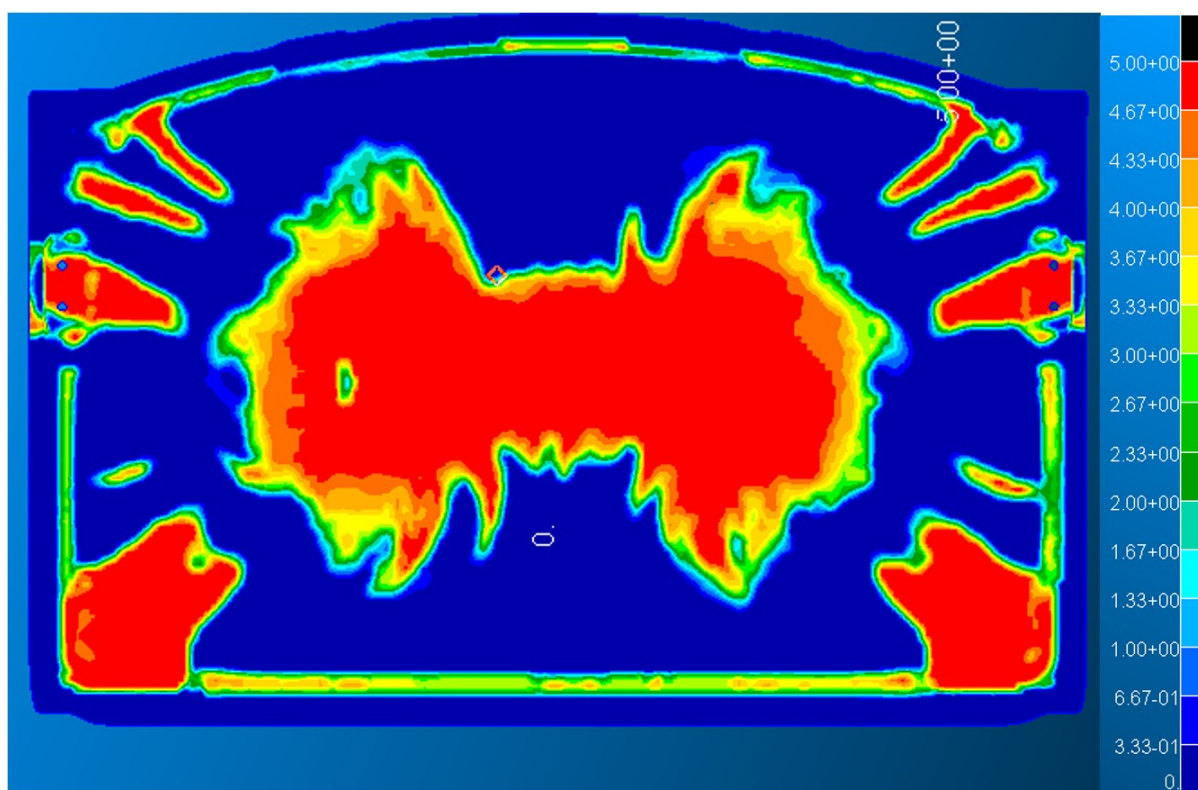
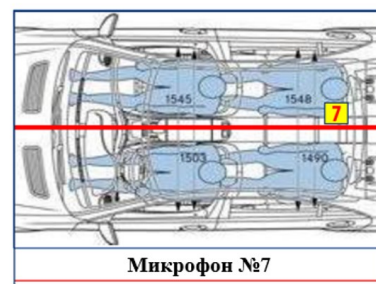
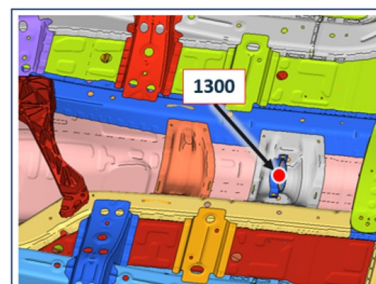
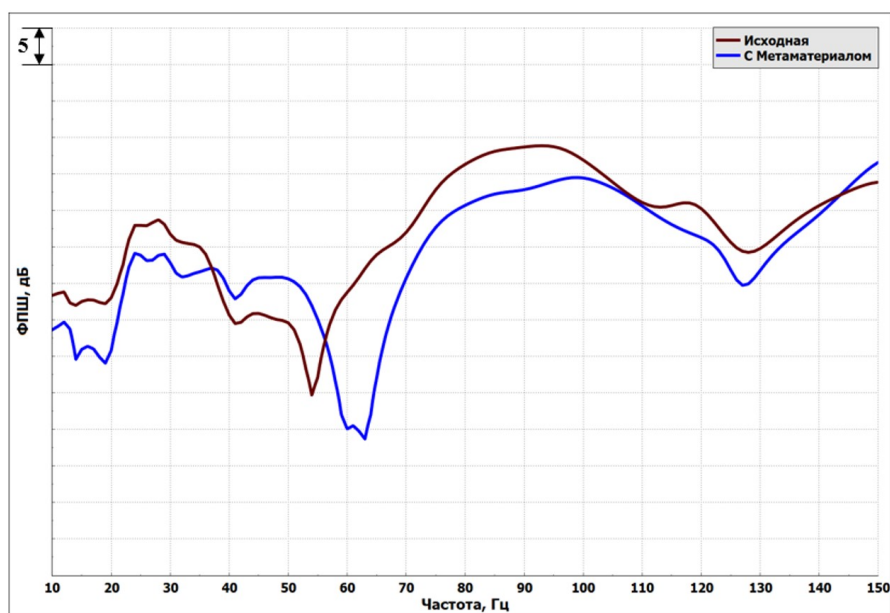


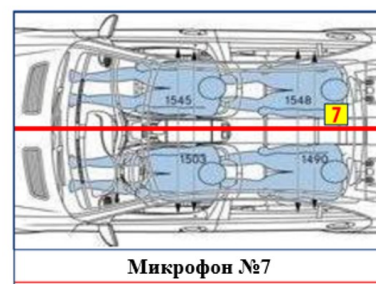
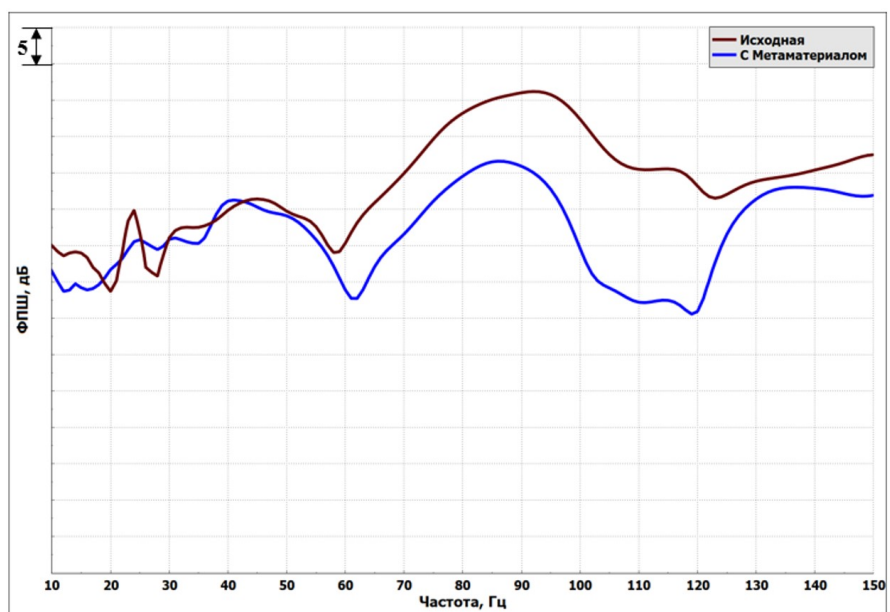
Рис. 12. Результат топографической оптимизации: положение и глубина штамповки на панели

По результатам топографической оптимизации частота первой формы собственных колебаний увеличилась на 48,9 Гц, а виброскорость наружной поверхности уменьшена до 28%.

Результаты сравнительных расчетов ФПШ, а именно исходной конструкции и конструкции с метаматериалом (с учетом топографической оптимизации задней панели пола) при динамических воздействиях на опору карданного вала (точка 1300), переднюю левую опору заднего подрамника (точка 1253) приведены на рисунках 13(а) и 13(б) соответственно. Акустический отклик также зафиксирован у левого уха заднего правого пассажира.



а



б

Рис. 13. Сравнительные графики ФПШ исходной конструкции и с конструкцией с материалом при приложении динамической нагрузки в: а – точке крепления опоры карданного вала, по направлению Z и б – левой передней точке крепления заднего подрамника, по направлению Z соответственно

Анализ результатов расчётных исследований показывает, что внедрение метаматериала позволило снизить ФПШ до 18 дБ.

Иллюстрация вынужденных форм колебаний на частоте 86 Гц до и после внедрения метаматериала при динамическом воздействии на опору карданного вала приведены на рисунке 14(а) и 14(б) соответственно.

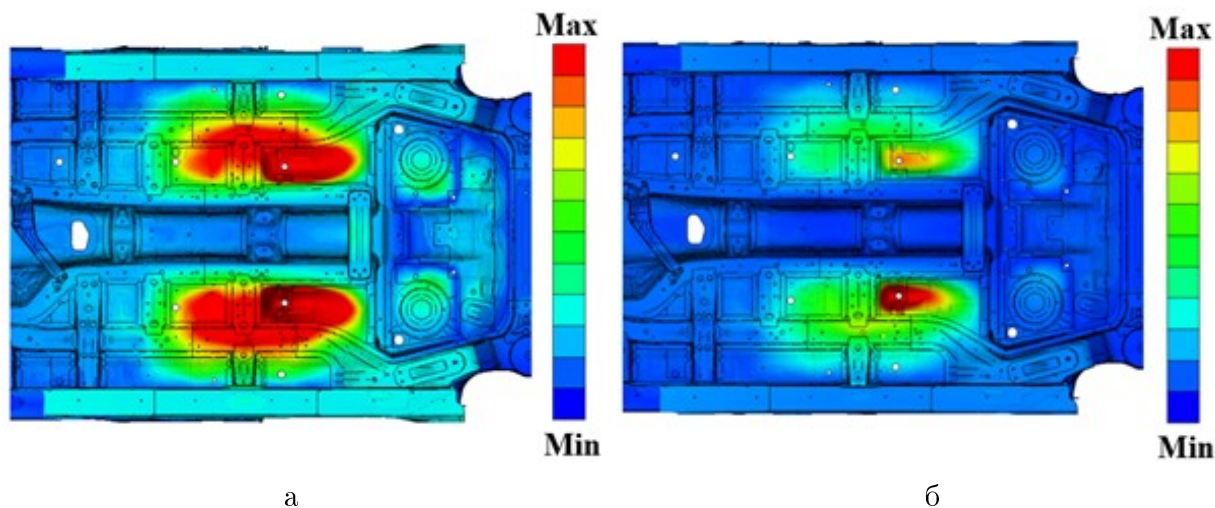


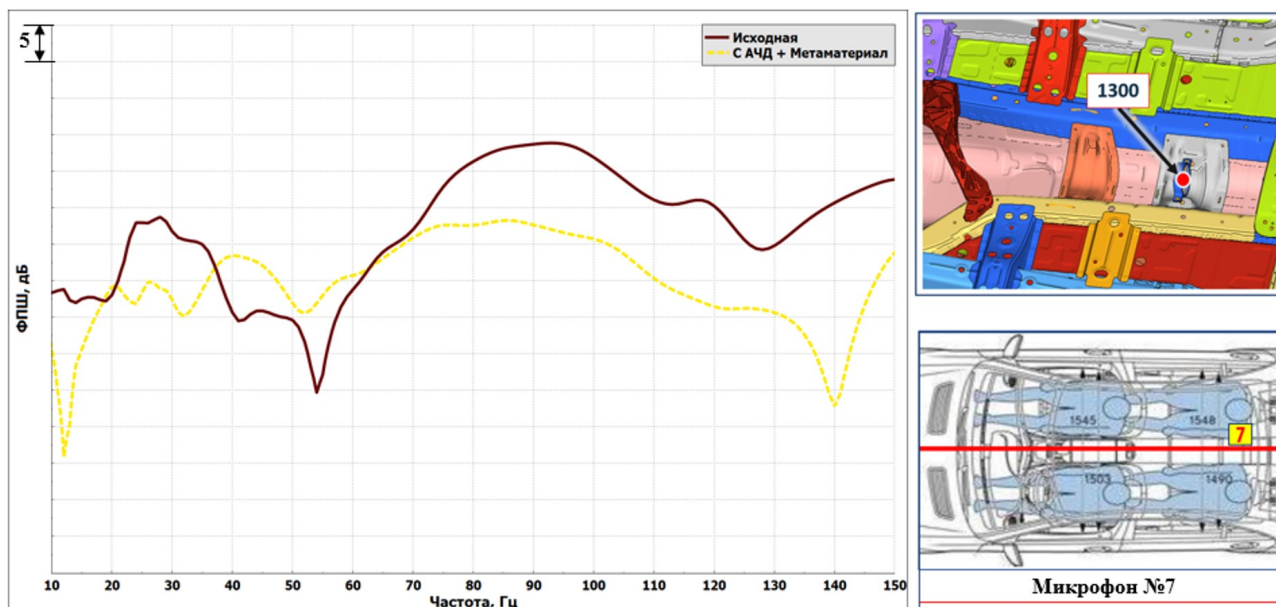
Рис. 14. Сравнительные формы вынужденных колебаний на частоте 86 Гц: а – исходное состояние и б – с метаматериалами

Анализ рисунка 14 показывает, что внедрение метаматериала позволило уменьшить зоны максимальных амплитуд виброперемещений и в целом наблюдается уменьшение колебаний излучающих поверхностей.

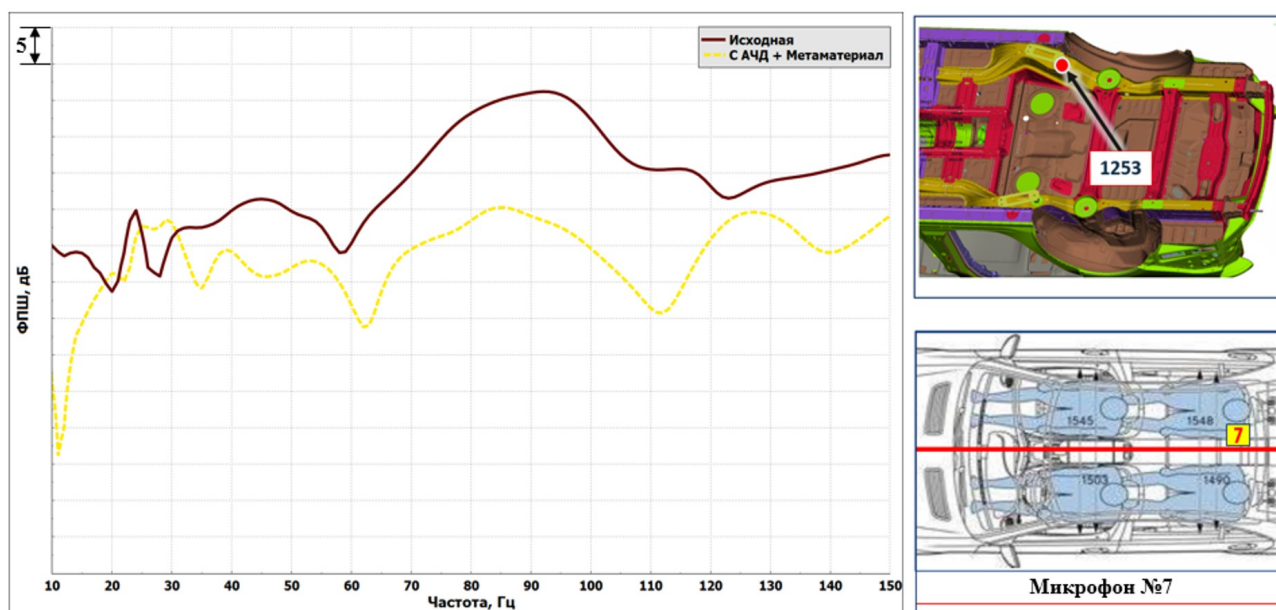
4. Исследования влияний ДА АЧД с метаматериалом на ФПШ

С целью исследования влияний ДА АЧД с метаматериалом на ФПШ проводились соответствующие расчетные исследования.

Результаты сравнительных расчетов ФПШ, а именно исходной конструкции и конструкции с ДА АЧД и метаматериалом при динамических воздействиях на опору карданного вала (точка 1300), переднюю левую опору заднего подрамника (точка 1253) приведены на рисунках 15(а) и 15(б) соответственно. Акустический отклик также зафиксирован у левого уха заднего правого пассажира.



а



б

Рис. 15. Сравнительные графики ФПШ исходной конструкции и с конструкцией с ДА АЧД и метаматериалом при приложении динамической нагрузки в: а – точке крепления опоры карданного вала, по направлению Z и б – левой передней точке крепления заднего подрамника, по направлению Z соответственно

Анализ результатов расчётных исследований показывает, что внедрение ДА АЧД с метаматериалом (с учетом топографической оптимизации задней панели пола) позволило снизить ФПШ до 27 дБ.

Иллюстрация вынужденных форм колебаний на частоте 86 Гц до и после внедрения ДА АЧД с метаматериалом при динамическом воздействии на опору карданного вала приведены на рисунке 16(а) и 16(б) соответственно.

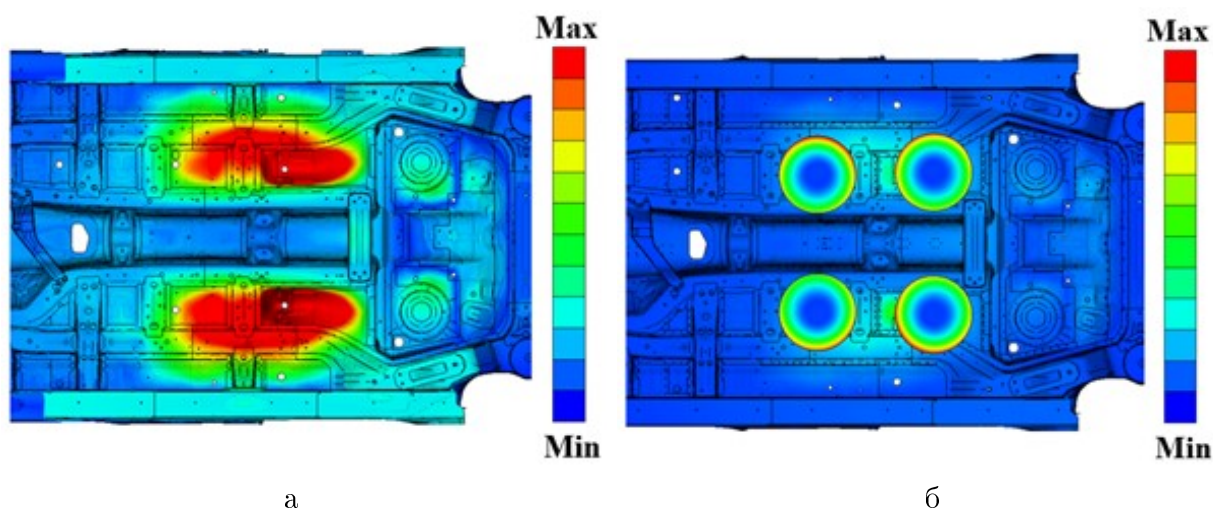
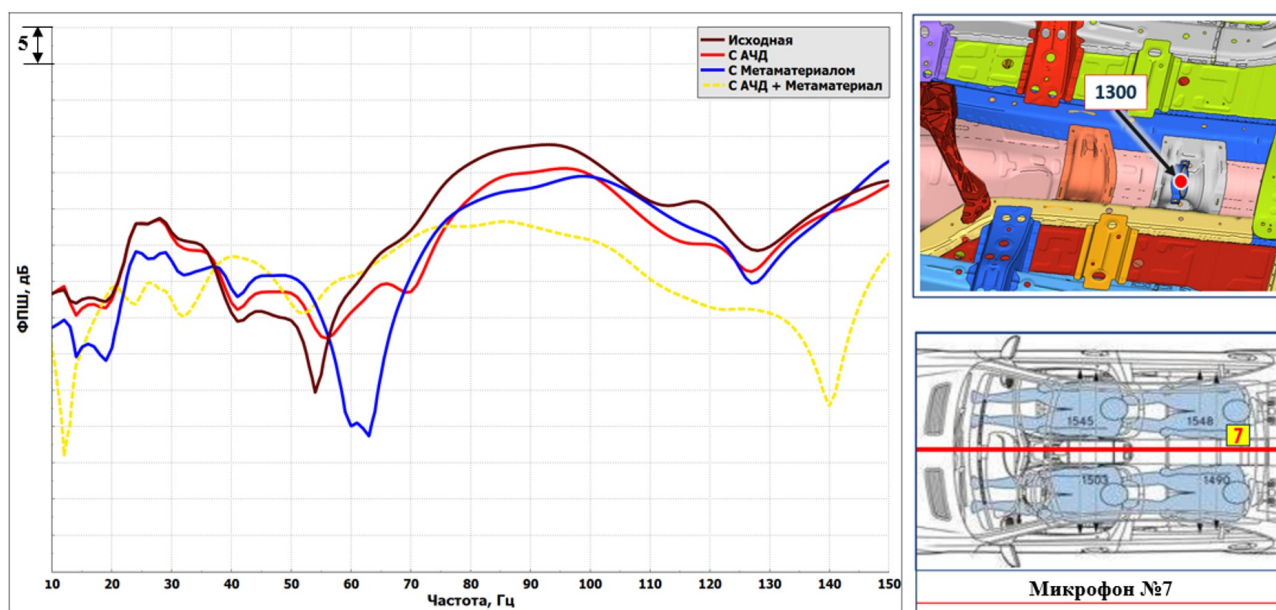
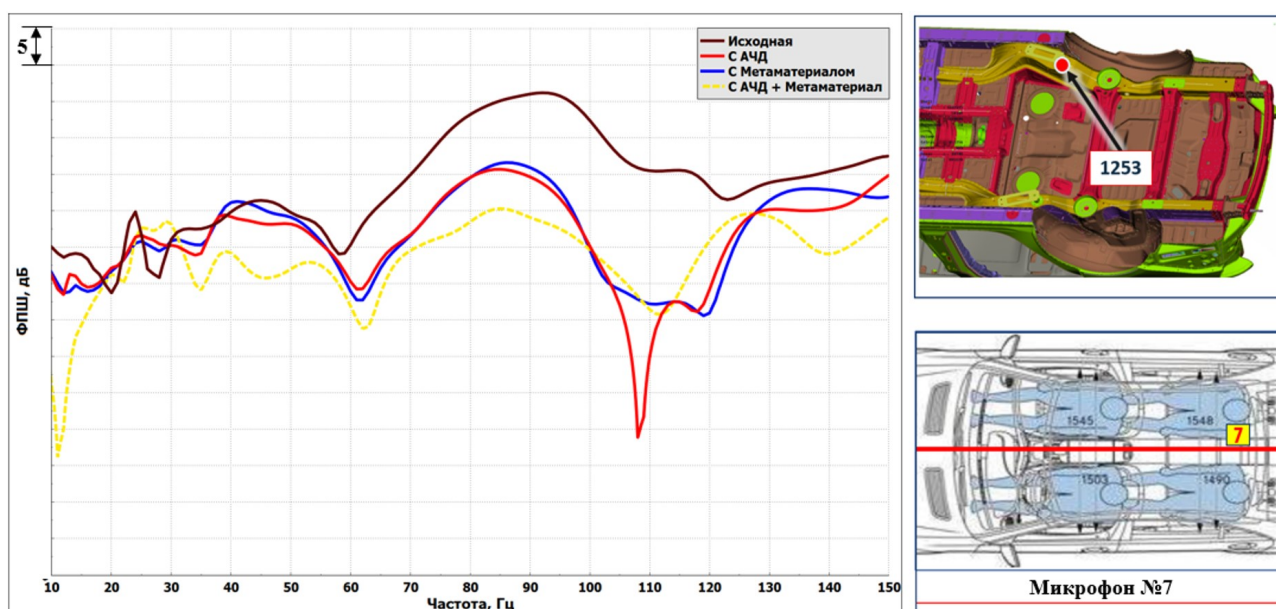


Рис. 16. Сравнительные формы вынужденных колебаний на частоте 86 Гц: а – исходное состояние и б – с установкой ДА АЧД с метаматериалами

Для оценки эффективности каждого технического решения проведен сравнительных анализ по критерию ФПШ. Результаты сравнительных расчетов ФПШ, а именно исходной конструкции, конструкции с ДА АЧД, конструкции с метаматериалом и конструкции с ДА АЧД и метаматериалом при динамических воздействиях на опору карданного вала (точка 1300), переднюю левую опору заднего подрамника (точка 1253) приведены на рисунках 17(а) и 17(б) соответственно. Акустический отклик также зафиксирован у левого уха заднего правого пассажира.



а



б

Рис. 17. Сравнительные графики ФПШ: а – в точке крепления опоры карданного вала, по направлению Z и б – в левой передней точке крепления заднего подрамника, по направлению Z соответственно

Анализ рисунка показывает, что внедрение ДА АЧД с метаматериалом максимально улучшает виброакустические характеристики зеленого кузова.

Исследования, представленные в статье, выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, научный проект № 23-19-00258.

Заключение

Автор представил подход к прогнозированию качественного изменения виброакустических характеристик автотранспортного средства при использовании ДА АЧД и метаматериалов. В рамках работы:

1. Использован ДА АЧД с заданными характеристиками, в том числе с

вибродемпфирующим материалом;

2. Определены места установки ДА АЧД для получения максимального эффекта (максимального снижения структурного шума внутри АТС). Места установки ДА АЧД определены по результатам анализа ФПШ и анализа полей упругих деформаций на частоте, соответствующей максимальным значениям амплитуд ФПШ;

3. Применен метаматериал взамен стальных панелей пола и проведена топографическая оптимизация задней панели пола с целью уменьшения излучения колебательной энергии;

4. Для оценки эффективности каждого технического решения проведен сравнительный анализ по критерию ФПШ.

Автор предполагает практическую возможность снижения структурного низкочастотного шума (1-150 Гц) более чем на 27 дБ при использовании ДА АЧД и метаматериала. С этой целью, ведутся разработки ДА АЧД и метаструктур с настраиваемыми структурой и геометрией.

Список литературы

1. Рахматов Р.И. Исследования модальных характеристик с целью комплексной валидации расчётной модели на примере кузова современного автотранспортного средства / Р.И. Рахматов В.В. Тремясов, А.П. Ликеев, И.В. Малкин, А.В. Казаков, А.О. Кузьмин // Труды НАМИ. 2023;(3):6-32. <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-3-6-32>

2. Rakhmatov R.I. Development of vehicle noise-vibration-harshness analysis calculation method in order to improve NVH characteristics / V.E. Krutolapov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 (2021), №012106. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012106>

3. Rakhmatov R.I. Vehicle structural analysis calculation method development in order to improve noise-vibration-harshness characteristics / V.E. Krutolapov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 (2021), №012105. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012105>

4. S. Hoffmann, S. Rothe, S.C. Langer, Acoustic black holes – modelling, shaping, placement and application. Chapter in the book Calm, Smooth and Smart (Springer, 2023) pp. 169–188. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36143-2_9

5. H. Ji, X. Zhao, N. Wang et al., A circular eccentric vibration absorber with circumferentially graded acoustic black hole features. Journal of Vibration and Acoustics 144 (2022) 1-35. <https://doi.org/10.1115/1.4053475>

6. T. Zhou, L. Cheng, Planar swirl-shaped acoustic black hole absorbers for multi-directional vibration suppression. Journal of Sound and Vibration 516 (2022), 116500. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116500>.

7. Гапоненко В.Р., Бардаханов С.П., Труфанов Д.Ю. Влияние температуры на свойства свободно насыпанных оксидных наноразмерных неорганических порошков Журнал "Стекло и керамика", Т. 96 No. 10 (1150). С. 10-20. (год публикации - 2023) <https://doi.org/10.14489/glc.2023.10.pp.010-020>

8. Chang-Myung L, Evgeny K, Vladimir G, Alexey L, Julia B, Alexander P. Parametric control of quasi-zero stiffness mechanisms for vibration isolation at near-zero frequencies. Journal of Vibration and Control. 2024;0(0). <https://doi.org/10.1177/10775463241239381>

9. Карпов Е.В., Говердовский В.Н., Ларичкин А.Ю., Бровкина Ю.И., Прохоров А.Н. Полимерные композиты для систем виброизоляции бортового и наземного

оборудования Тезисы II Отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки», Красноярск, Россия, 4-6 октября 2023, с. 10 (год публикации - 2023)

References

1. Rakhmatov R.I. Studies of modal characteristics aimed at comprehensive validation of a calculation model by the example of a modern vehicle body / R.I. Rakhmatov, V.V. Tremyasov, A.P. Likeev, I.V. Malkin, A.V. Kazakov, A.O. Kuzmin // Trudy NAMI. 2023;(3):6-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-3-6-32>
2. Rakhmatov R.I. Development of vehicle noise-vibration-harshness analysis calculation method in order to improve NVH characteristics / V.E. Krutolapov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 (2021), №012106. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012106>
3. Rakhmatov R.I. Vehicle structural analysis calculation method development in order to improve noise-vibration-harshness characteristics / V.E. Krutolapov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 (2021), №012105. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012105>
4. S. Hoffmann, S. Rothe, S.C. Langer, Acoustic black holes – modelling, shaping, placement and application. Chapter in the book *Calm, Smooth and Smart* (Springer, 2023) pp. 169–188. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36143-2_9
5. H. Ji, X. Zhao, N. Wang et al., A circular eccentric vibration absorber with circumferentially graded acoustic black hole features. *Journal of Vibration and Acoustics* 144 (2022) 1-35. <https://doi.org/10.1115/1.4053475>
6. T. Zhou, L. Cheng, Planar swirl-shaped acoustic black hole absorbers for multi-directional vibration suppression. *Journal of Sound and Vibration* 516 (2022), 116500. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116500>.
7. Gaponenko V.R., Bardakhanov S.P., Trufanov D.Yu. Influence of temperature on the properties of freely poured oxide nanosized inorganic powders *Journal of Glass and Ceramics*, Vol. 96 No. 10 (1150). С. 10-20. (year of publication - 2023) <https://doi.org/10.14489/glc.2023.10.pp.010-020>
8. Chang-Myung L, Evgeny K, Vladimir G, Alexey L, Julia B, Alexander P. Parametric control of quasi-zero stiffness mechanisms for vibration isolation at near-zero frequencies. *Journal of Vibration and Control*. 2024;0(0). <https://doi.org/10.1177/10775463241239381>
9. Karpov E.V., Goverdovskiy V.N., Larichkin A.Y., Brovkina Y.I., Prokhorov A.N. Polymer composites for vibration isolation systems of onboard and ground equipment Abstracts of the II Industry Scientific and Practical Conference “Roscosmos Constellation: Trajectory of Science”, Krasnoyarsk, Russia, October 4-6, 2023, p. 10 (year of publication - 2023)