

УДК: 629.017:629.018

OECD: 629.017:629.018

Исследования шума автотранспортного средства при взаимодействии с набегающим потоком

Рахматов Р.И.^{1*}, Надарейшвили Г.Г.², Дмитриев Н.А.³¹К.т.н., главный специалист²Д.т.н., заместитель Генерального директора по науке³Начальник отдела базовых потребительских свойств^{1,2,3}ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, РФ

Аннотация

В статье приводится подход к исследованию шума автотранспортного средства при взаимодействии с набегающим потоком. В рамках работы описана последовательность действий исследования. Разработаны конечно-элементные модели автотранспортного средства для газодинамических и аэроакустических исследований. Проведены расчетные исследования газодинамических характеристик при взаимодействии с набегающим потоком, а также проведены расчетные исследования аэроакустических источников шума гибридным методом Меринга. По итогам расчетных исследований определены распределения плотности аэроакустических источников по Мерингу. С целью оценки адекватности расчетных исследований проведены экспериментальные исследования в аэроакустической трубе. Проведена валидация расчетной модели по критерию совпадения зон аэроакустических источников. С целью определения влияния набегающего потока на внутренний шум проведены экспериментальные исследования и разработаны технические решения позволяющие уменьшить внутренний шум от набегающего потока.

Ключевые слова: автотранспортные средства, аэроакустика, конечно-элементное моделирование, гибридное моделирование, газодинамическое моделирование, идентификация аэроакустических источников по Мерингу, экспериментальные исследования, валидация, NVH (Noise, Vibration and Harshness).

Research of motor vehicle noise interacting with the onrushing air flow

Rakhmatov R.I.^{1}, Nadareishvili G.G.², Dmitriev N.A.³**¹PhD, chief specialist**²DsC, Deputy General director for science**³Head of NVH Department**^{1,2,3}FSUE 'NAMI', Moscow, Russia*

Abstract

The article presents an approach to the research of motor vehicle noise in interaction with the onrushing flow. Within the framework of the work the sequence of actions of the research is described. Finite element models of a vehicle for gas dynamic and aeroacoustic research are developed. The computational research of gas-dynamic characteristics at interaction with the onrushing airflow is carried out, and also the computational research of aeroacoustic noise sources by the hybrid Mering's method is carried out. The Mering density distributions of aeroacoustic sources were determined based on the results of the computational studies. In

order to evaluate the adequacy of the computational studies, experimental research was carried out in an aeroacoustic tunnel. Validation of the computational model by the criterion of coincidence of the aeroacoustic source zones was carried out. In order to determine the influence of the onrushing flow on the internal noise, experimental research has been carried out and technical solutions have been developed to reduce the internal noise from the oncoming flow.

Keywords: vehicles, aeroacoustics, finite element modeling, hybrid modeling, gas dynamic modeling, Mering aeroacoustic source identification, experimental studies, validation, NVH.

Введение

Неотъемлемой частью эксплуатации автотранспортного средства (АТС) является загородный режим движения со скоростями свыше 100 км/ч, при которых основной вклад во внутренний шум вносят аэроакустические источники шума.

Исследования, посвященные решению задач как внешнего, так и внутреннего шума посвящены работы Camussi R. [1], Chode K.K. [2, 3], Ekman P. [4], He Y. [5-7], Menter F.R. [8], Page G.J. [9], Read C. [10], Su X. [11], Viswanathan H. [12, 13], Wang Y. [14], Wang D. [15], Шашурина А.Е. [16 - 18], Васильева В.А. [19, 20] и Санникова В.А. [21].

Анализ работ показывает, что аэроакустический и аэровиброакустический шум формируется:

1. Аэродинамическими вихрями (шум формы), возникающими при взаимодействии воздушного потока с автотранспортным средством. Этот шум присутствует во всем частотном диапазоне: от низких и средних частот, создаваемых в зонах передней части капота до высоких частот, создаваемых боковыми зеркалами, дворниками, антенной, стойкой А и другими поверхностями АТС.
2. При совпадении частот собственных колебаний стекла и аэродинамической нагрузки на стекло. Этот шум характеризуется низкими и средними частотами.
3. Вибрациями уплотнений. Высокочастотный шум.
4. Колебаниями структуры кузова и навесных компонентов. Основной вклад во внутренний шум при взаимодействии набегающего потока вносит шум формы (около 80%), исследованию которого посвящена данная работа.

1. Последовательность действий для расчетного исследования аэроакустических источников

Для расчетных исследований аэроакустических характеристик автотранспортных средств использован гибридный метод. Данный метод разработан для расчета генерации и распространения шума с «приемлемыми» машинными затратами, с возможностью решения связанных задач, а также с учетом «всех» акустических эффектов. При этом у данного метода есть следующие допущения: акустические источники связаны с турбулентным потоком, а акустическое поле не влияет на поток.

Последовательность расчетных исследований с использованием гибридного метода следующая:

1. Расчёт нестационарного потока с помощью U-RANS, DES и LES:

1.1. Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса для нестационарного потока (Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations). Соответственно: применение осреднения по Рейнольдсу к уравнениям Навье-Стокса приводит к получению уравнений Рейнольдса, которые не замкнуты, замыкание уравнений Рейнольдса (определение турбулентных напряжений) производится с помощью полуэмпирических моделей турбулентности. Моделируются все турбулентные вихри;

1.2. Метод моделирования оторвавшихся вихрей (Detached Eddy Simulation - DES). Соответственно: комбинация классической RANS-формулировки с элементами метода LES, точное предсказание турбулентного пограничного слоя вплоть до точки отрыва, вычислительные затраты для течений при больших числах Re на порядки меньше.

1.3. Метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation - LES). Соответственно: уравнения переноса решаются относительно «разрешимых масштабов», крупные вихри разрешаются, мелкие – моделируются, решение по определению нестационарно, Δt диктуется наименьшими разрешёнными вихрями.

2. Интерполяция газодинамической сетки с извлеченными данными потока к акустической сетке;

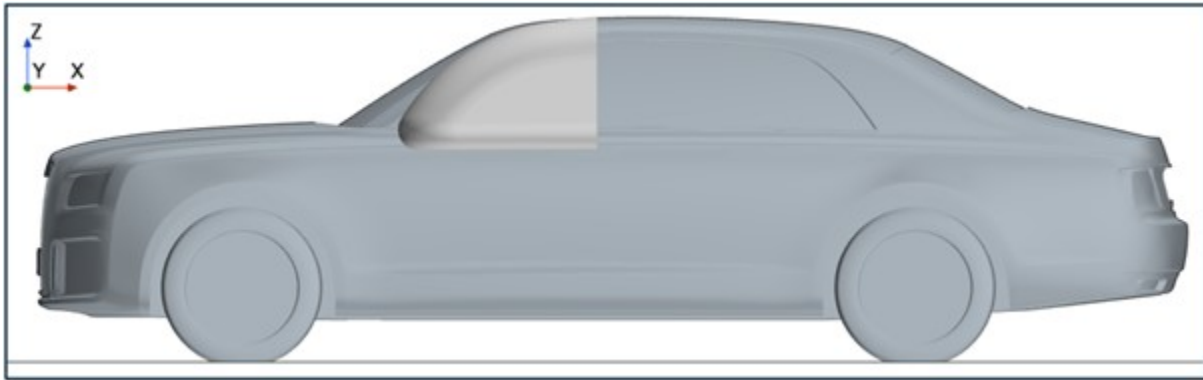
3. Расчет аэроакустических источников шума – плотности аэроакустических источников по Мерингу;

Следует отметить, что основная идея аналогии Мёринга характеризуется использованием скалярных уравнений, которые больше всего подходят для описания распространения звука в неоднородной среде, что требует средних значений термодинамических параметров потока. Уравнение, описывающее генерацию звука и распространение, имеет следующий вид:

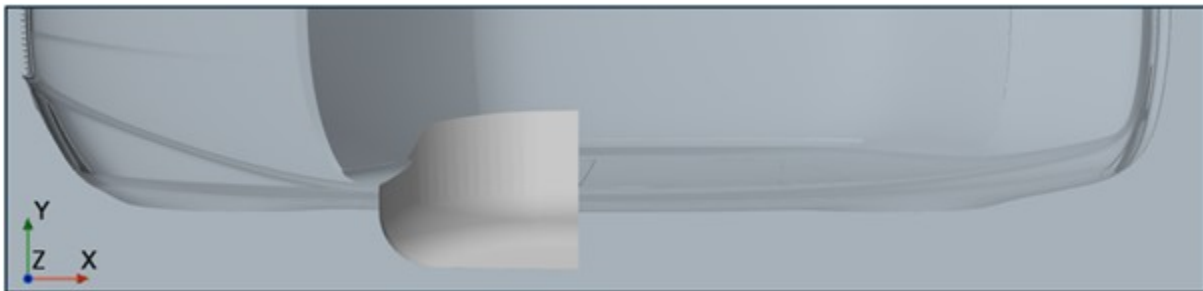
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho}{\rho_T^2 c^2} \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\rho v_i}{\rho_T^2 c^2} \frac{\partial b}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho v_i}{\rho_T^2 c^2} \left(\frac{\partial b}{\partial t} + v_i \frac{\partial b}{\partial x_i} \right) - \frac{\rho}{\rho_T} \frac{\partial b}{\partial x_i} \right) = \\ = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho}{\rho_T} (\vec{v} \cdot \vec{\omega})_i - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_i}{\rho_T} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_p \frac{\partial S}{\partial t} - \frac{\rho T}{\rho_T} \frac{\partial S}{\partial x_i} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho_T} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_p \frac{\partial S}{\partial t} - \frac{\rho v_i}{\rho_T^2} \frac{\partial \rho_T}{\partial x_i} \right). \end{aligned}$$

2. Расчетные исследования аэроакустических источников

Для исследования аэроакустических источников разработана расчетная модель на основе математической модели АТС с учетом рекомендаций фирм Siemens, Blue Engineering и Porsche Engineering по исследованию внешней аэродинамики АТС. С целью сокращения вычислительных затрат задача решена в симметричной постановке. Иллюстрация внешней «оболочки» с учетом рекомендаций АТС приведена на рисунке 1.



а



б

Рис. 1. Модель транспортного средства: а – вид спереди и б – вид сверху

Иллюстрация конечно-элементной модели (КЭМ) в сечении плоскости симметрии для газодинамических расчетов выполненная в Siemens Star CCM+ приведена на рисунке 2.

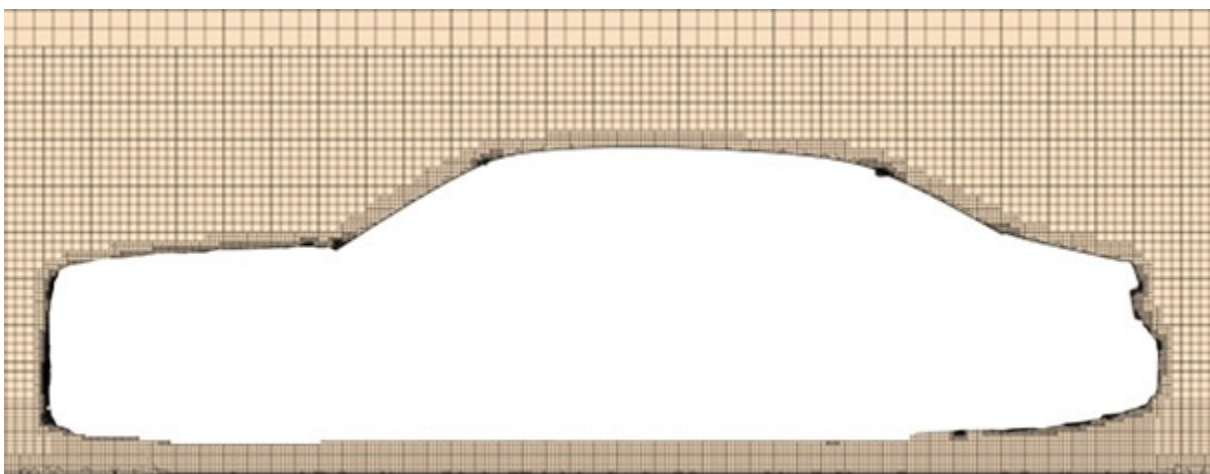


Рис. 2. Конечно-элементная модель АТС

Согласно теореме Котельникова (Найквиста — Шеннона): частотная дискретизация определяется по максимальному временному интервалу ($\Delta f = 1/T$), а максимальная частота определяется по временному шагу ($f_{max} = 1/(2Te)$). Где Δf — частотная дискретизация, T — временной интервал, f_{max} — максимальная частота и Te — шаг по времени. На основе вышеизложенного, для аэроакустической задачи с максимальной частотой 5000 Гц с шагом 5 Гц проведен газодинамический расчет с максимальным временем расчета 0,2 сек и с шагом 0,0001 сек с автосохранением данных векторной величины скорости и скалярных величин: температуры, давления, плотности, кинетической энергии турбулентного потока и скорости звука.

В качестве примера на рисунке 3 приведены результаты расчетных исследований в виде распределения кинетической энергии турбулентного потока по поверхности АТС.

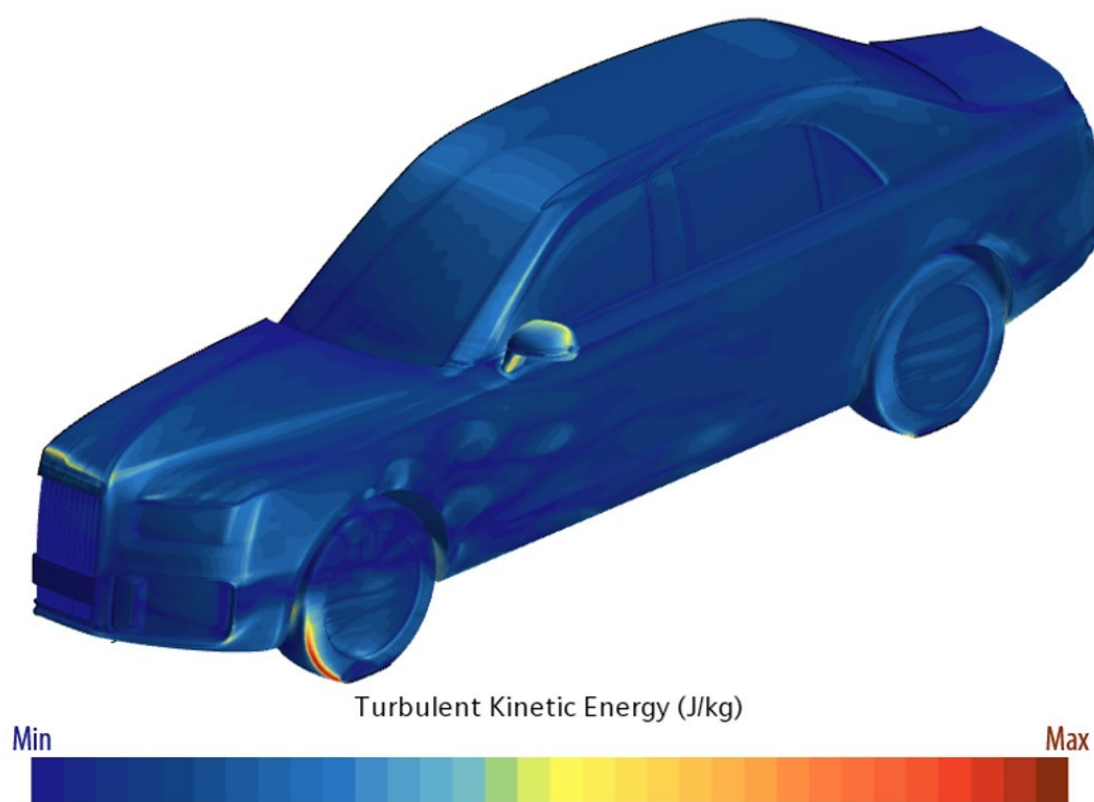
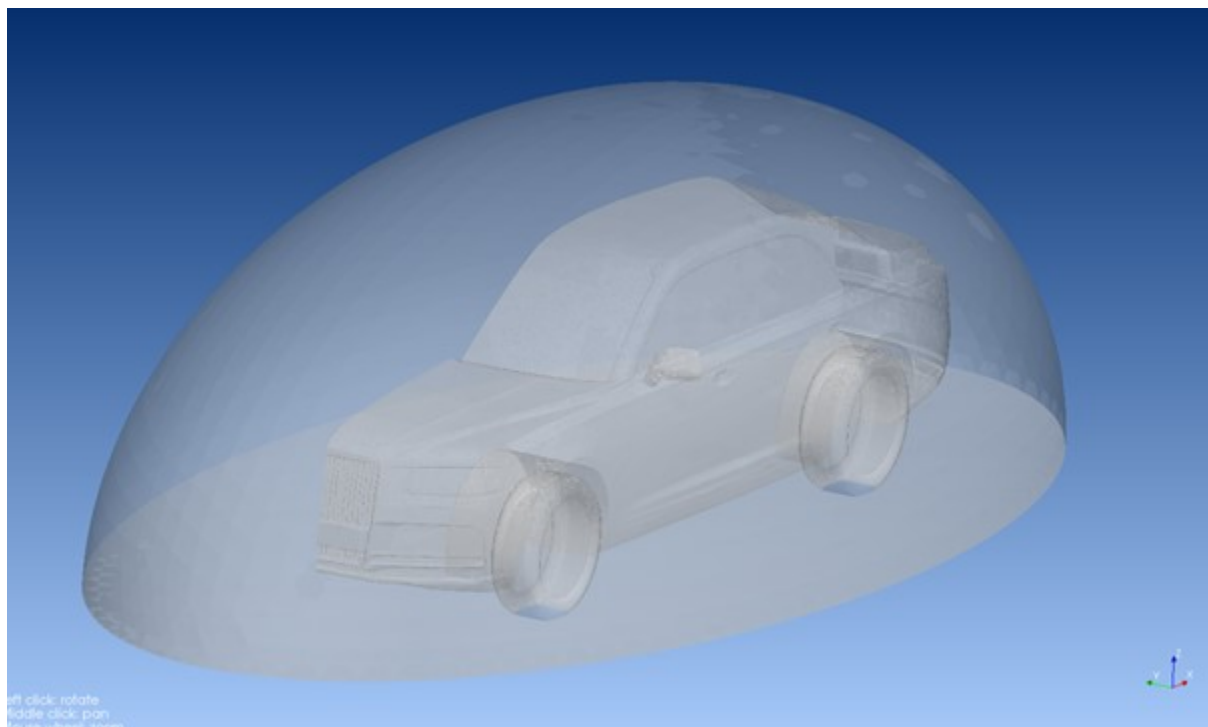


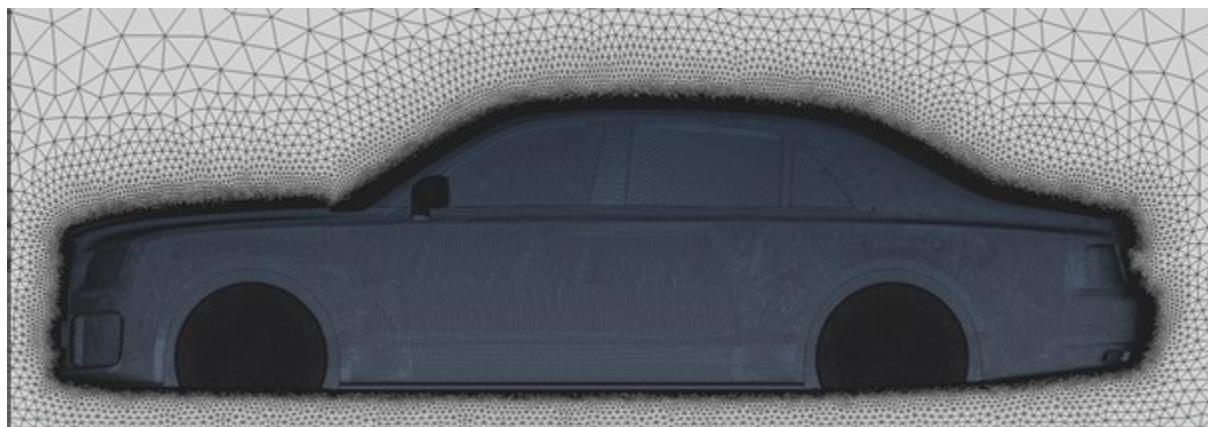
Рис. 3. Результаты расчетных исследования распределения кинетической энергии турбулентного потока

Кинетическая энергия турбулентного потока сконцентрирована в зоне зеркала заднего вида, стойки А, передней части капота, нижней левой части бампера и внешней нижней кромки переднего колеса.

Далее проводилась интерполяция газодинамической сетки с извлеченными газодинамическими данными к акустической сетке. Акустическая сетка разработана с учетом рекомендации разработчика программы Atran, фирмы Hexagon. Иллюстрация геометрии и акустической сетки (со скрытыми колесами) приведена на рисунках 4(а) и 4(б) соответственно.



а



б

Рис. 4. Модель транспортного средства: а – геометрия и б – КЭМ

В качестве примера на рисунке 5 приведены результаты расчетных исследований в виде распределения плотности аэроакустических источников по Мёрингу в горизонтальной плоскости на уровне боковых зеркал заднего вида.

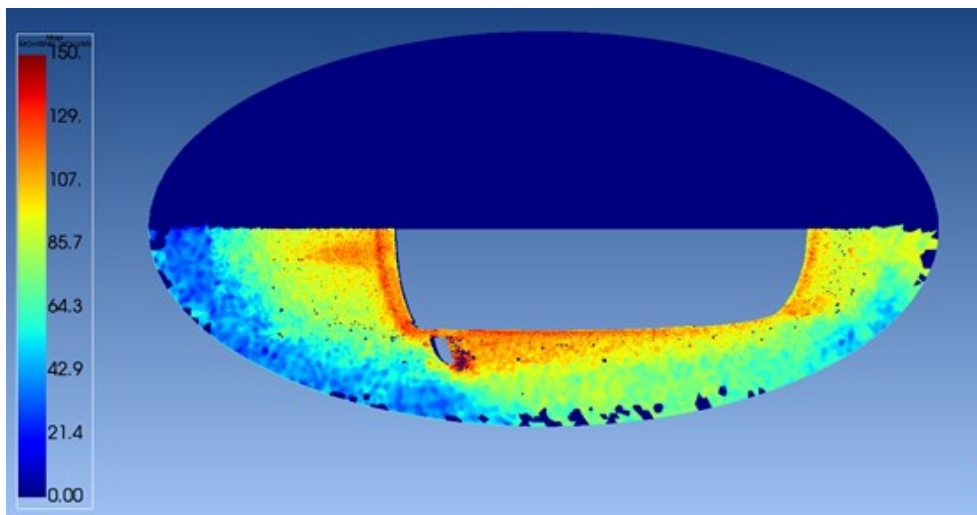


Рис. 5. Результат расчетных исследований источников аэроакустического шума аналогией Меринга

Плотность аэроакустических источников по Мерингу в основном сконцентрирована в зоне зеркала заднего вида, стойки А и пространством между задним стеклом и крышкой багажника. С целью валидации расчетной модели проведены экспериментальные исследования.

3. Экспериментальные исследования внешнего шума

Аэроакустические исследования проведены в аэроакустической трубе с установленными направленными микрофонными решетками, иллюстрация которых приведена на рисунке 6.

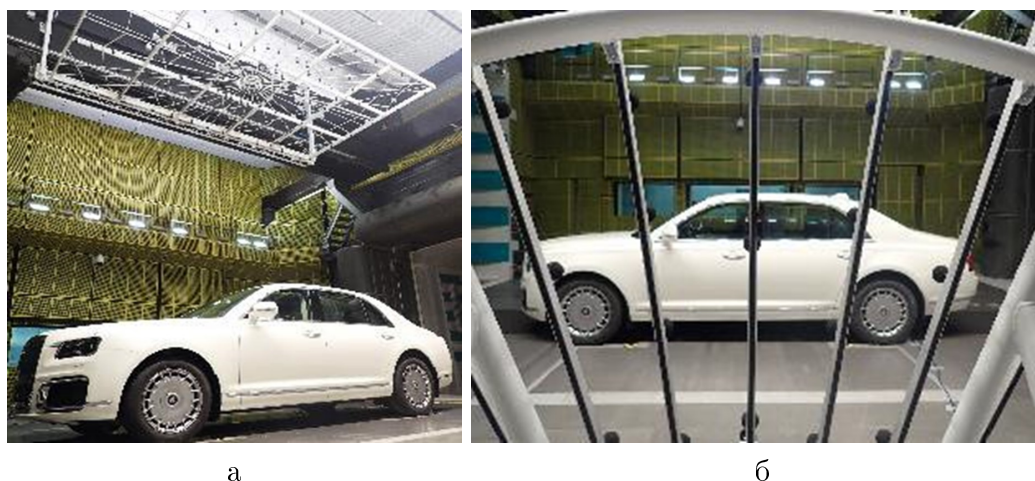
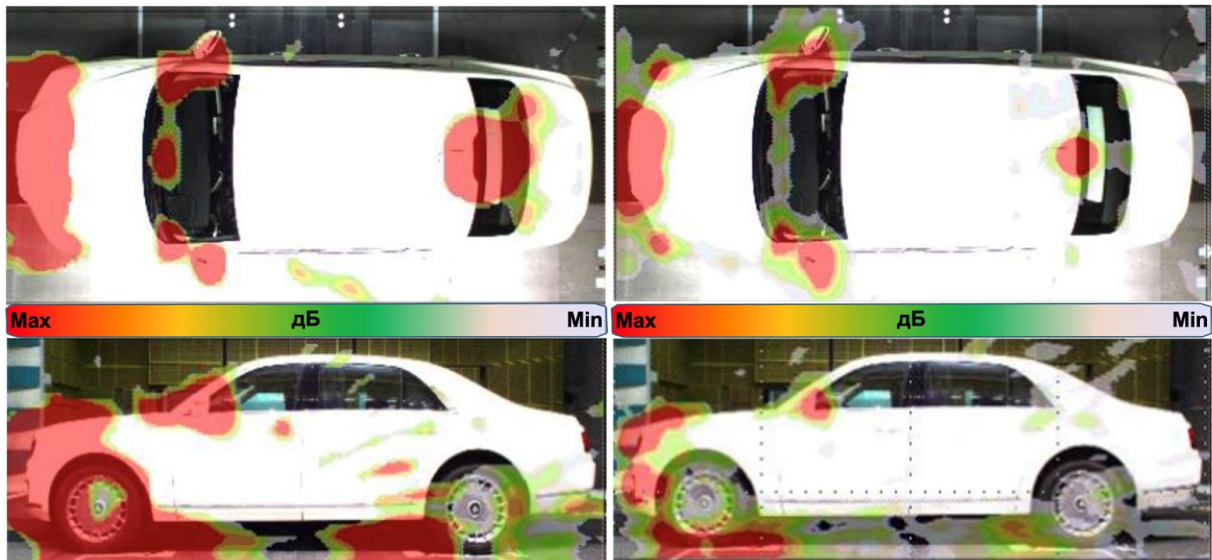


Рис. 6. Направленные микрофонные решетки для исследования внешнего акустического излучения при взаимодействии АТС с набегающим потоком установленными:
а – над АТС и б – сбоку АТС

Пример результатов экспериментальных исследований аэроакустических характеристик (внешний шум при воздействии набегающего потока) АТС на скорости потока 140 км/час в виде распределения звукового давления на плоскости микрофонных решеток методом биформинга (beamforming) на частотах 1600, 2500 и 3150 Гц приведены на рисунках 7(а), 7(б) и 7(в) соответственно.



а



б

Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований аэроакустических характеристик при скорости потока 140 км/час на частотах: 1600 Гц – а, 2500 Гц – б и 3150 Гц – в

Анализ результатов экспериментальных исследований на скоростях потока 140 и 200 км/час показывает, что основным источником шума являются боковые зеркала заднего вида, стойка А, переход между задним стеклом и крышкой багажника, стоп-сигнал, желобки опускных стекол, стекло неподвижное боковое заднее, двери и дверные ручки.

4. Сравнение результатов расчетных и экспериментальных исследований

Иллюстрация сравнения расчетных исследований зон аэроакустических источников по Мерингу и распределения уровней звуковых давлений по поверхности АТС, определенных при экспериментальных исследованиях приведены на рисунке 8.

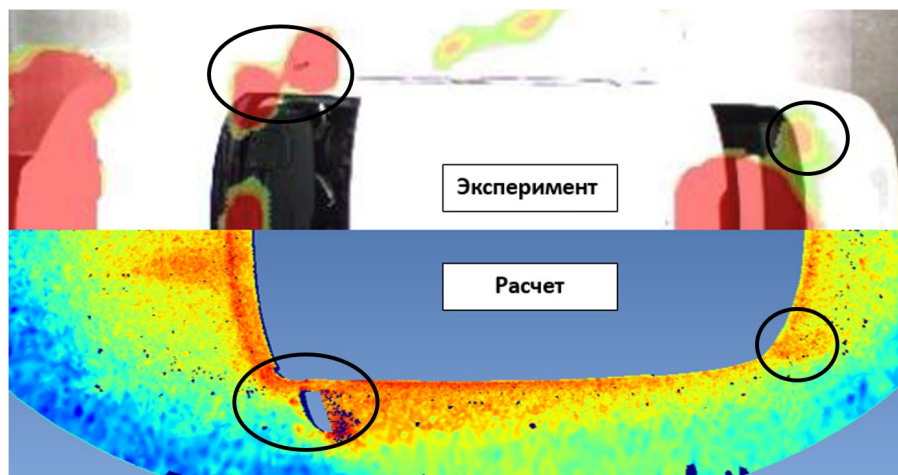


Рис. 8. Распределения уровней звуковых давлений по поверхности АТС, замеренные микрофонными решетками (верхний рисунок-эксперимент) и распределения плотностей аэроакустических источников по Мерингу (нижний рисунок-расчет):
 скорость – 140 км/час и частота – 1600 Гц

Анализ рисунков показывает, что локальные зоны максимальных амплитуд уровней звуковых давлений (верхний рисунок) соответствуют локальным зонам мест максимальных амплитуд плотности аэроакустических источников по Мерингу (нижний рисунок) определенных расчетным способом (в сечении бокового зеркала заднего вида), свидетельствующее об адекватности расчетных исследований.

С целью определения влияния набегающего потока на внутренний шум и подготовки экспериментальных данных для сравнительного анализа расчетной модели по внутреннему шуму проведены экспериментальные исследования.

5. Экспериментальные исследования внутреннего шума

Для аэровиброакустического исследования (исследования внутреннего шума при взаимодействии АТС с набегающим потоком) на АТС установлены, микрофонные системы, учитывающие физиологию органа слуха человека. Иллюстрация установленных микрофонных систем на первый ряд сидений (на местах водителя и переднего пассажира) и на второй ряд сидений (на местах задних пассажиров) приведена на рисунках 9(а) и 9(б) соответственно.

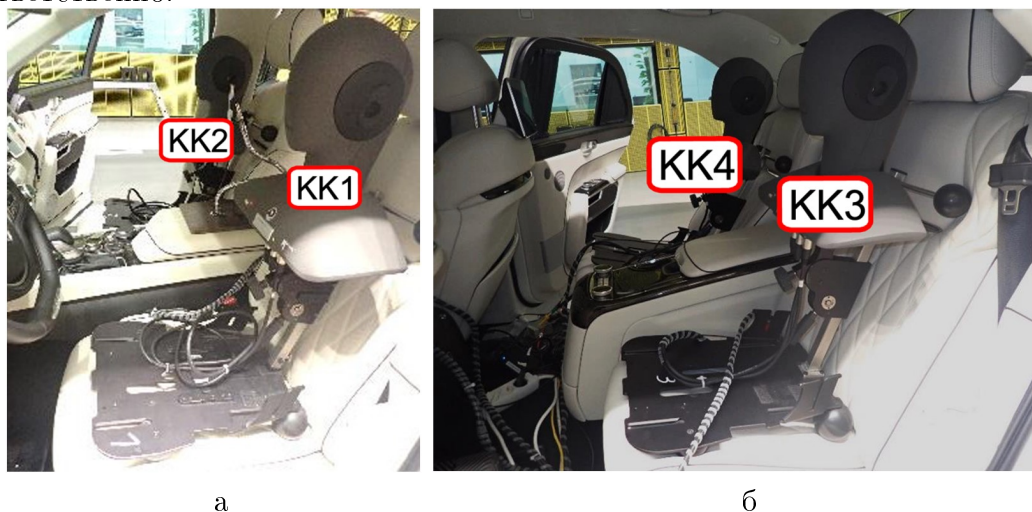
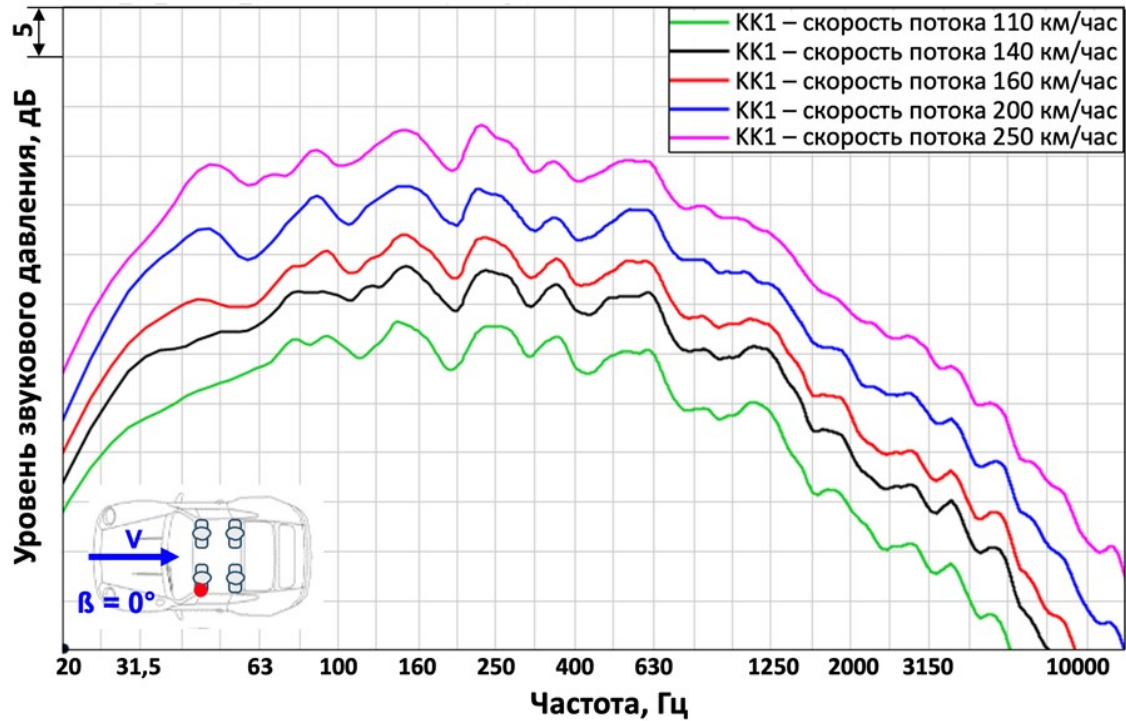
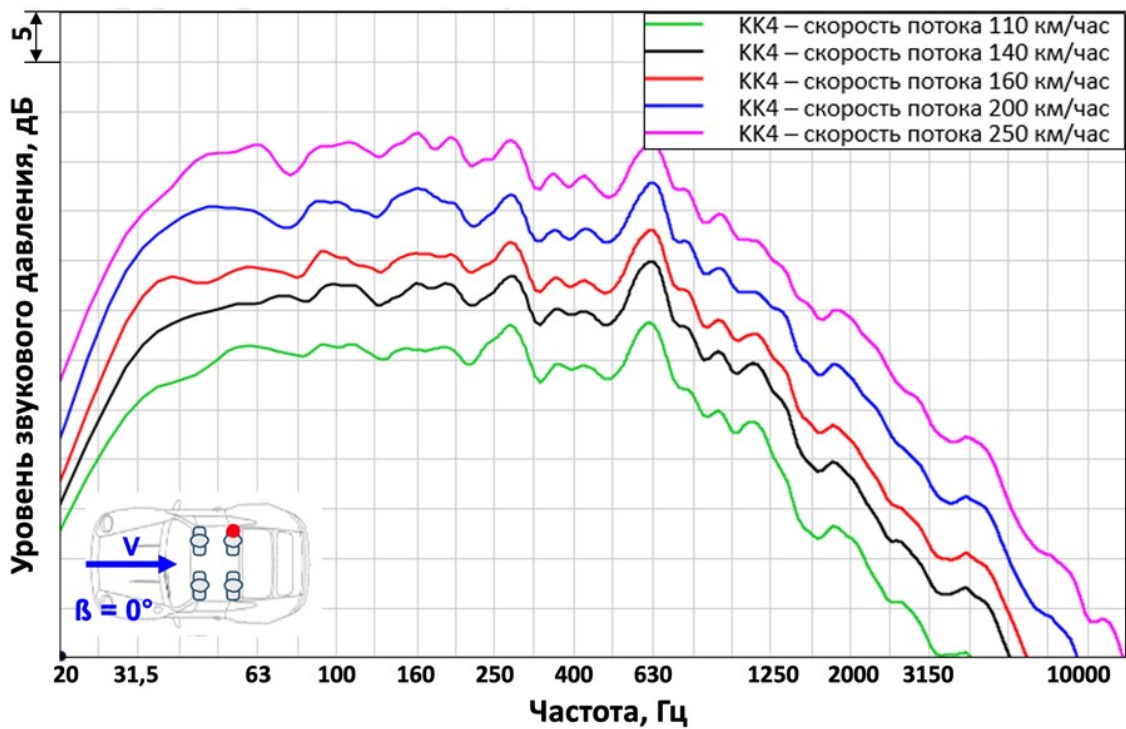


Рис. 9. Микрофонные системы для измерения шума внутри АТС, установленные в:
 а – на первом ряду сидений и б – на втором ряду сидений

Результаты экспериментальных исследований аэровиброакустических характеристик, а именно уровня звукового давления измеренного у левого уха водителя (КК1) и правого уха заднего правого пассажира на скоростях потока 110, 140, 160, 200 и 250 км/час приведены на рисунках 10(а) и 10(б) соответственно.



а



б

Рис. 10. Результаты экспериментальных исследований уровня звукового давления измеренного у: левого уха водителя (а) и правого уха заднего правого пассажира (б)

При увеличении скорости наблюдается линейное увеличение уровня звукового давления.

Анализ проведенных экспериментальных исследований показал, что основными источниками шума являются:

- переход между задним стеклом и крышкой багажника (отсутствие уплотнительного элемента в передней части крышки багажника позволяет воздуху создавать колебания акустического объема между крышкой багажника и задним окном. Влияние данной полости заметно в виде пика в частотном диапазоне 600-1000 Гц. Иллюстрация схемы образования шума и предлагаемое решение приведено на рисунке 11.

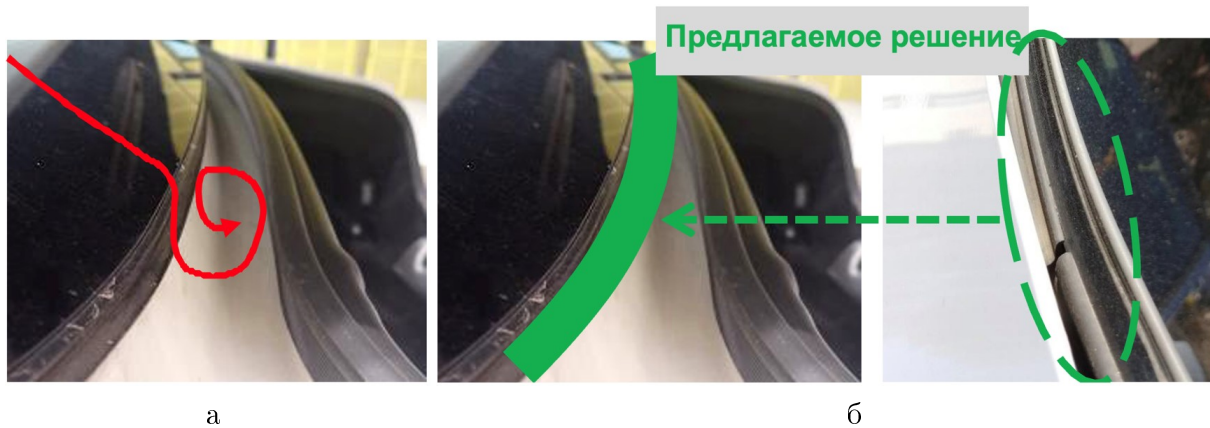


Рис. 11. Схема образования аэроакустического шума между задним стеклом и крышкой багажника (а) и предлагаемые решения для снижения данного шума (б)

- стоп-сигнал. Влияние данной детали заметно в виде широкополосного шума в частотном диапазоне 600-3000 Гц;

- желобки опускных стекол. Влияние данной детали заметно в виде широкополосного шума на частоте выше 1000 Гц;

- двери. Влияние дверей заметно на частоте ниже 1000 Гц;

- дверные ручки. Влияние данной детали заметно в виде широкополосного шума в частотном диапазоне 1000-4000 Гц.

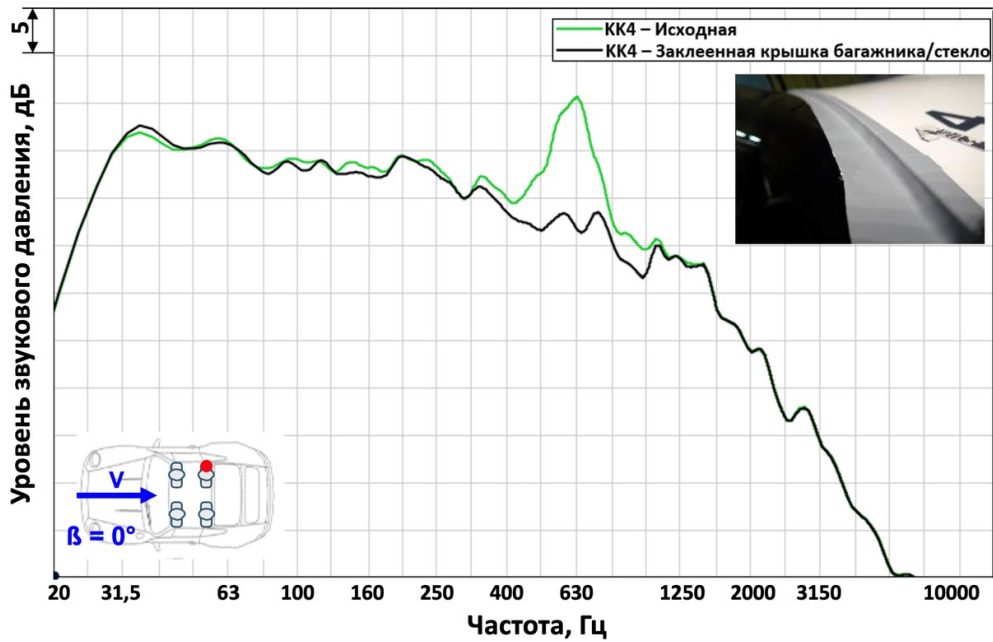
Иллюстрация основных источников шума с выделением компонентов, максимально влияющих на внутренний шум, приведена на рисунке 12.



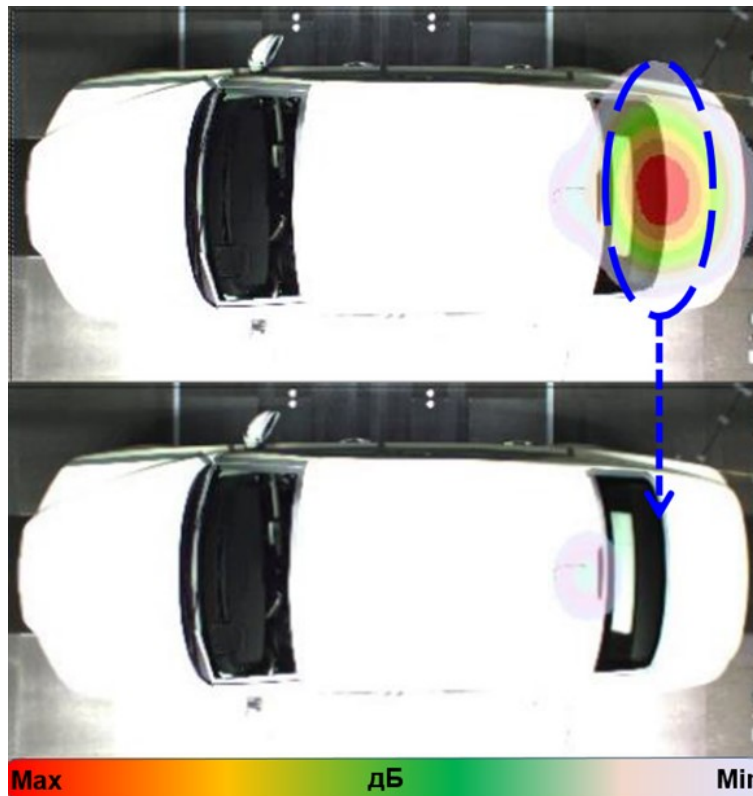
Рис. 12. Основные источники аэроакустического шума: красная линия – источники с максимальным вкладом на внутренний шум, желтая линия – источники с средним вкладом на внутренний шум и синяя линия – источники с низким вкладом на внутренний шум

С целью снижения внутреннего шума проведены мероприятия для улучшения аэроакустических и аэровиброакустических характеристик, в частности:

1. Заклеивание зазора между крышкой багажника и задним стеклом (рисунок 13).



а

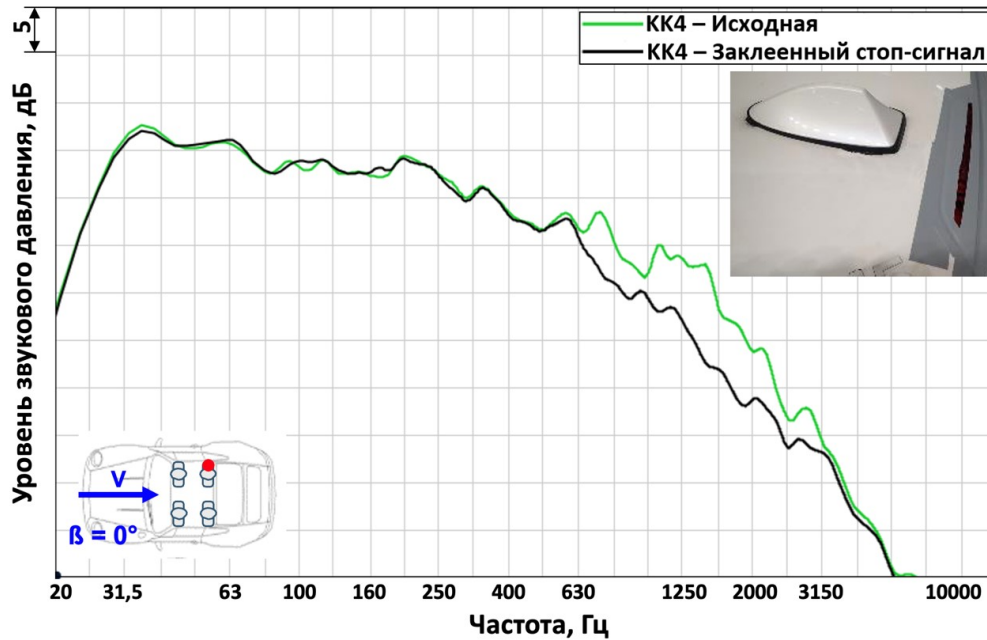


б

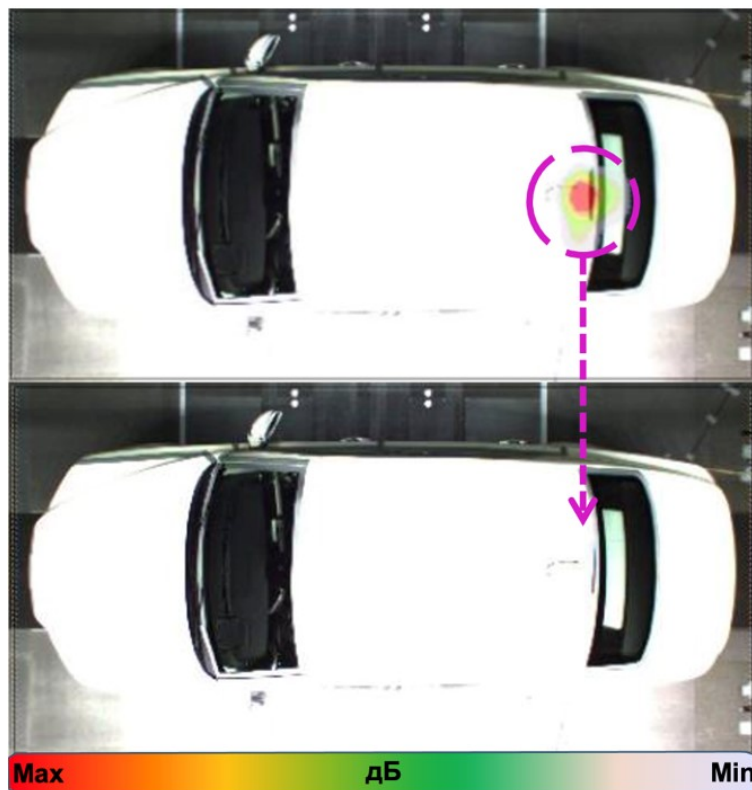
Рис. 13. Результаты экспериментальных исследований уровня звукового давления измеренного у: левого уха водителя (а) и правого уха заднего пассажира (б)

При заклеивании пространства между крышкой багажника и задним стеклом зафиксировано существенное снижение уровня звукового давления в частотном диапазоне 600-1000 Гц до 15 дБА.

2. Заклеивание зазора вокруг верхнего стоп-сигнала (на крыше) (рисунок 14).



а



б

Рис. 14. Результаты экспериментальных исследований исходной и заклеенного стоп-сигнала: а – уровень звукового давления, измеренного у правого уха заднего правого пассажира и б – распределение звукового давления на частоте 2000 Гц

При заклеивании зазора вокруг стоп-сигнала зафиксировано существенное снижение уровня звукового давления в частотном диапазоне 600-3000 Гц до 10 дБА.

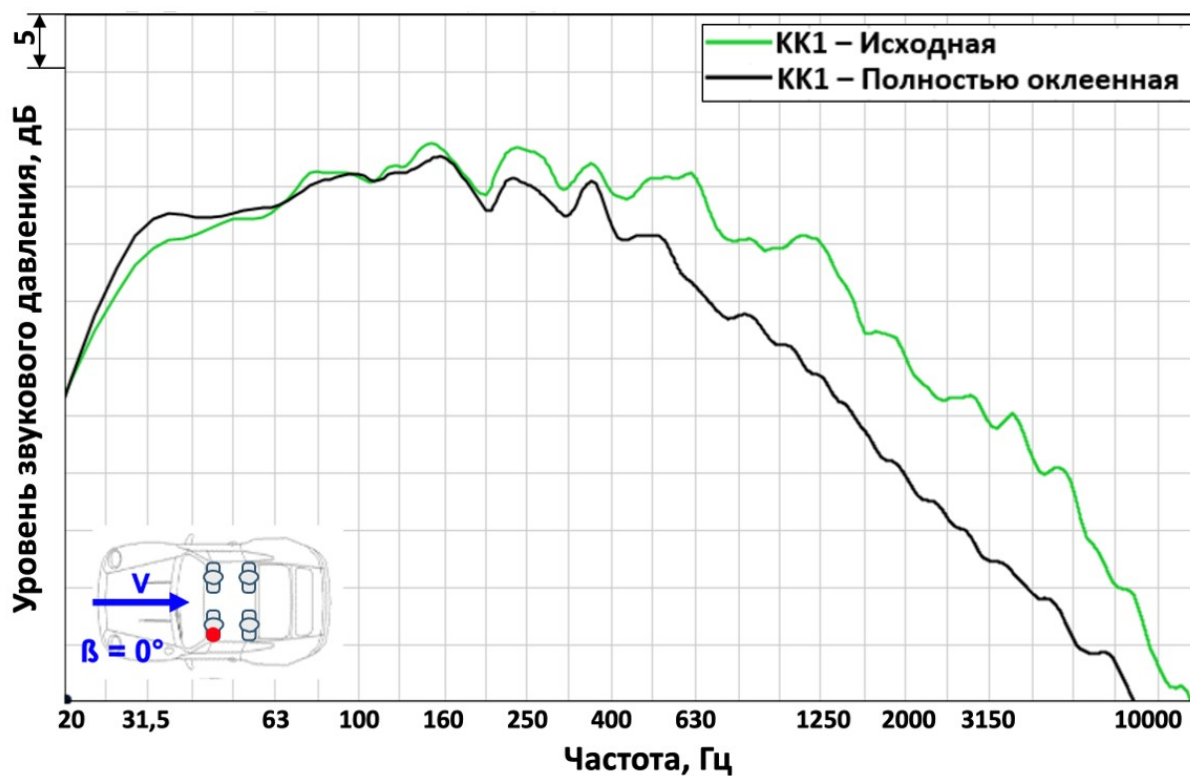
Таким образом, проведены мероприятия для улучшения аэроакустических и аэровиброакустических характеристик, и определено влияние на шум каждого из мероприятий. Соответственно, по результатам мероприятий разрабатываются технические решения, направленные на улучшения аэроакустических и аэровиброакустических характеристик АТС. При этом в приоритете технические решения, которые максимально уменьшают общий уровень шума, замеренные внутри АТС.

Заключительным этапом исследования является анализ исходного и полностью оклеенного состояния АТС, которое показывает максимально возможное снижение внутреннего шума. Иллюстрация оклеенных элементов экстерьера АТС приведена на рисунке 15.

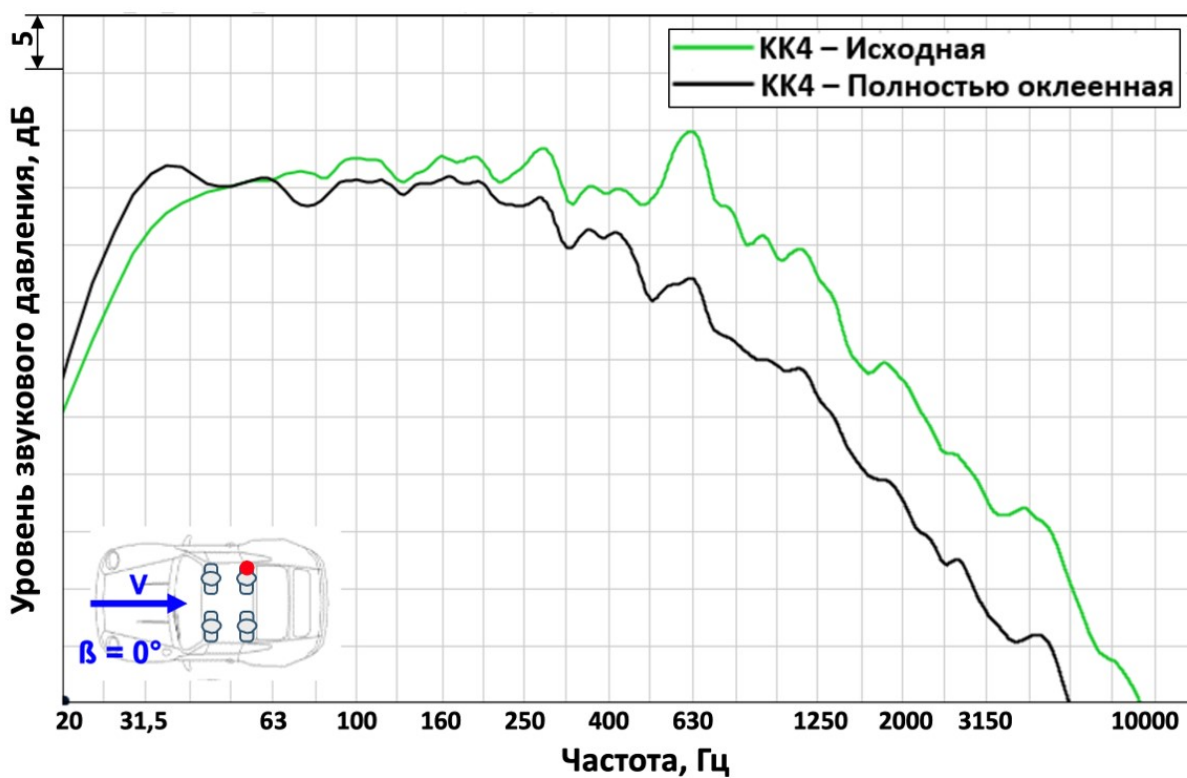


Рис. 15. Оклеены экстерьерные элементы АТС: а – передние боковые неподвижные стекла, б – желобки передних опускных стекол, в – желобки задних опускных стекол и задние боковые неподвижные стекла, г – передние и задние двери, д – дверные ручки, е – периметр заднего окна, ж – боковые зеркала заднего вида, з – периметр ветрового стекла, и – водосток и к – лючок бензобака

Результаты экспериментальных исследований исходной и полностью заклеенной АТС приведены на рисунке 16.



а



б

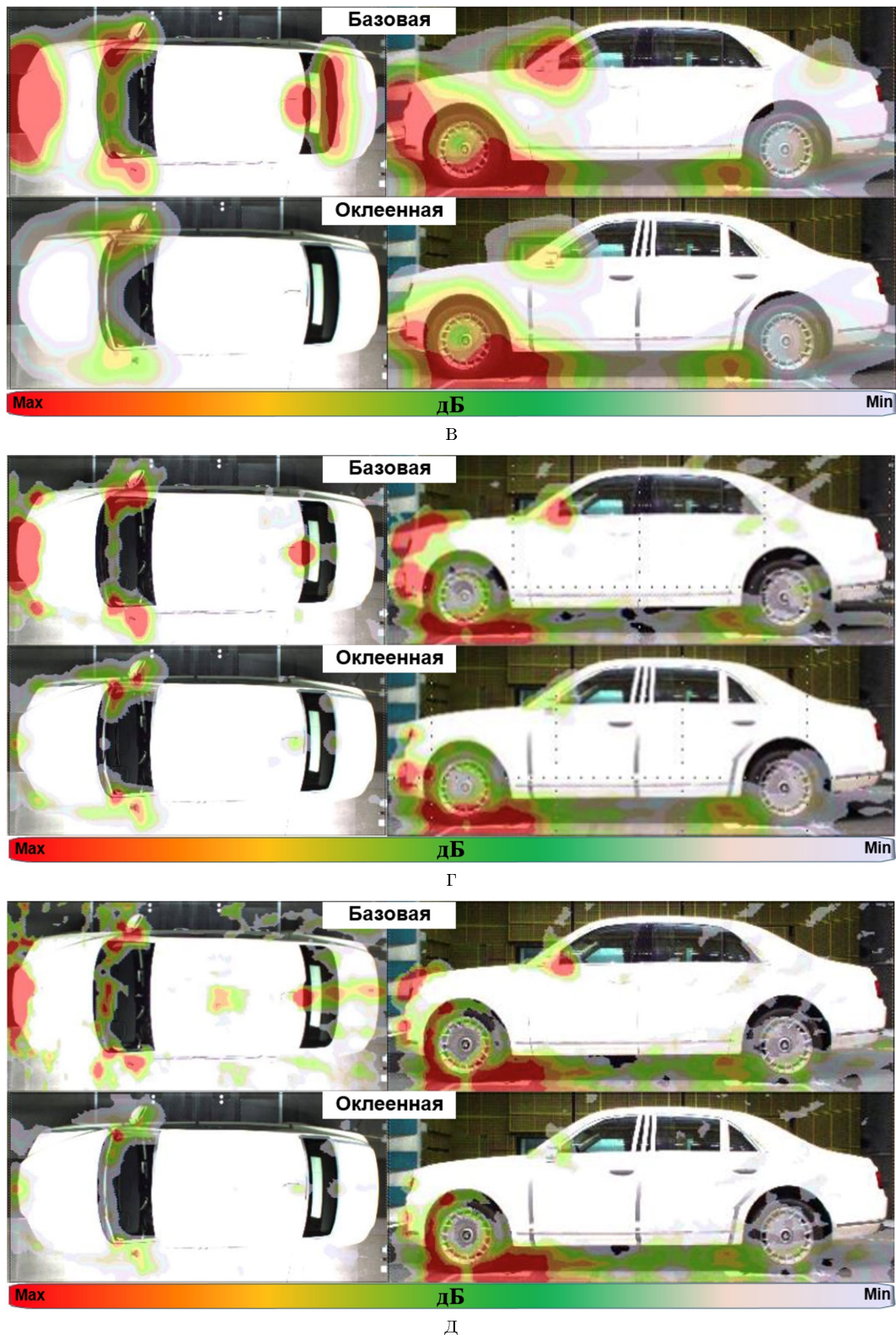


Рис. 16. Результаты экспериментальных исследований исходной и полностью оклеенного АТС: а – уровень звукового давления, измеренного у левого уха водителя, б – уровень звукового давления, измеренного у правого уха заднего правого пассажира, в – распределение звукового давления на частоте 1000 Гц, г – распределение звукового давления на частоте 2500 Гц и д – распределение звукового давления на частоте 3150 Гц.

Зафиксировано существенное снижение уровня звукового давления, измеренного внутри АТС, в частотном диапазоне 600-10000 Гц до 15 дБА при полной оклейке АТС.

Заклучение

Разработан подход к исследованиям шума при взаимодействии с набегающим потоком. В рамках работы:

1. Описана последовательность действий для проведения расчетных исследований;
2. Разработана конечно-элементная модель автотранспортного средства для аэродинамического моделирования и проведены расчётные исследования;
3. Разработана конечно-элементная модель автотранспортного средства для исследования аэроакустических источников шума и проведены расчетные исследования источников аэроакустического шума по Мерингу;
4. Проведены экспериментальные исследования аэроакустических характеристик автотранспортного средства;
5. Проведена валидация расчетной модели;
6. Проведены экспериментальные исследования и мероприятия для улучшения акустических характеристик автотранспортного средства при взаимодействии с набегающим потоком, и определены вклады на шум каждого из мероприятий;
7. Проведен анализ влияния разработанных мероприятий на внешний и внутренний шум.

Список литературы

1. Camussi, R., Bennett, G.J.: Aeroacoustics research in Europe: the CEAS-ASC report on 2019 highlights. *J. Sound Vib.* 484, 115540 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115540>
2. Chode, K.K., Viswanathan, H., Chow, K., Reese, H.: Investigating the aerodynamic drag and noise characteristics of a standard squareback vehicle with inclined side-view mirror configurations using a hybrid computational aeroacoustics (CAA) approach. *Phys. Fluids* (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0156111>
3. Chode, K.K., Viswanathan, H., Chow, K.: Numerical investigation on the salient features of flow over standard notchback configurations using scale resolving simulations. *Comput. Fluids* 201, 104666 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104666>
4. Ekman, P., Wieser, D., Virdung, T., Karlsson, M.: Assessment of hybrid RANS-LES methods for accurate automotive aerodynamic simulations. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 206, 104301 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104301>
5. He, Y., Schröder, S., Shi, Z., Blumrich, R., Yang, Z., Wiedemann, J.: Wind noise source filtering and transmission study through a side glass of DrivAer model. *Applied Acoust.* 160, 107161 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107161>
6. He, Y., Wan, R., Liu, Y., Wen, S., Yang, Z.: Transmission characteristics and mechanism study of hydrodynamic and acoustic pressure through a side window of DrivAer model based on modal analytical approach. *J. Sound Vib.* 501, 116058 (2021a)
7. He, Y., Wen, S., Liu, Y., Yang, Z.: Wind noise source characterization and transmission study through a side glass of DrivAer model based on a hybrid DES/APE method. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Auto-mob. Eng.* 235, 1757–1766 (2021b)
8. Menter, F.R., Hüppe, A., Flad, D., Garbaruk, A.V., Matyushenko, A.A., Stabnikov, A.S.: Large Eddy simulations for the Ahmed car at 25° slant angle at different Reynolds numbers. In: *Flow Turbulence and Combustion*. Springer Science and Business Media LLC (2023)
9. Page, G.J., Walle, A.: Towards a standardized assessment of automotive aerodynamic CFD prediction capability—AutoCFD 2: Windsor Body Test Case Summary.

In: SAE Technical Paper Series. WCX SAE World Congress Experience. SAE International (2022)

10. Read, C., Viswanathan, H.: An aerodynamic assessment of vehicle-side wall interaction using numerical simulations. *Int. J. Autom. Mech. Eng.* 17, 7587–7598 (2020). <https://doi.org/10.15282/ijame.17.1.2020.08.0563>

11. Su, X., He, K., Xu, K., Gao, G., Krajnović, S.: Comparison of flow characteristics behind squareback bluff-bodies with and without wheels. *Phys. Fluids* 35, 035114 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0138305>

12. Viswanathan, H.: Aerodynamic performance of several passive vortex generator configurations on an Ahmed body subjected to yaw angles. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02850-8>

13. Viswanathan, H., Chode, K.K.: The influence of forebody topology on aerodynamic drag and aeroacoustic characteristics of Squareback Vehicles using CAA. In: *Aerovehicles 5*, Poitiers, France, 12–14 June 2023. Available from: <https://shura.shu.ac.uk/id/eprint/32049> (2023)

14. Wang, Y., Thompson, D., Hu, Z.: Numerical investigations on the flow over cuboids with different aspect ratios and the emitted noise. *Phys. Fluids* 32, 025103 (2020)

15. Wang, D., Sun, M., Shen, X., Chen, A.: Aerodynamic characteristics and structural behavior of sound barrier under vehicle-induced flow for five typical vehicles. *J. Fluids Struct.* 117, 103816 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103816>

16. Шашурин А.Е., Васильев В.А. Методика оценки акустического поля от автотранспортного потока // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* - 2023. - N 8. - С. 601-611.

17. Шашурин А.Е. Снижение внутреннего шума звукоизолирующими кабинами: на примере строительно-дорожных машин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Балт. гос. техн. ун-т (ВОЕНМЕХ) им. Ф.Д. Устинова. Санкт-Петербург, 2010. - С. 182.

18. Звукопоглощающая панель для шумозащитной конструкции Шашурин А.Е., Заплетников И.Н., Кириченко В.А., Иванов Н.И., Бужинский К.В., Светлов В.В., Бойко Ю.С. Патент на полезную модель RU 171794 U1, 16.06.2017. Заявка № 2016141361 от 20.10.2016.

19. Васильев В.А. Проблема выбора акустического центра автотранспортного потока // *Noise Theory and Practice.* -2022. -N 8 (3). -С. 34-42.

20. Васильев В.А., Ксенофонтова В.К. Шум автомобильного транспорта // *Noise Theory and Practice.* - 2020. - Т. 6. N 1. - 66-76 с. (Vasilyev V.A., Ksenofontova V.K. Highway Traffic Noise // *Noise Theory and Practice.* - 2020. - V. 6. N 1. - pp. 66-76.)

21. Санников В.А., Дроздова Л.Ф., Кудаев А.В. Определение структурного шума, образованного колебаниями отдельной панели салона автомобиля // *Noise Theory and Practice.* - 2020. - Т 6. N 4. - 148-154 с.

References

1. Camussi, R., Bennett, G.J.: Aeroacoustics research in Europe: the CEAS-ASC report on 2019 highlights. *J. Sound Vib.* 484, 115540 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115540>

2. Chode, K.K., Viswanathan, H., Chow, K., Reese, H.: Investigating the aerodynamic drag and noise characteristics of a standard squareback vehicle with inclined side-view mirror configurations using a hybrid computational aeroacoustics (CAA) approach. *Phys. Fluids* (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0156111>

3. Chode, K.K., Viswanathan, H., Chow, K.: Numerical investigation on the salient features of flow over standard notchback configurations using scale resolving simulations. *Comput. Fluids* 201, 104666 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104666>
4. Ekman, P., Wieser, D., Virdung, T., Karlsson, M.: Assessment of hybrid RANS-LES methods for accurate automotive aerodynamic simulations. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 206, 104301 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104301>
5. He, Y., Schröder, S., Shi, Z., Blumrich, R., Yang, Z., Wiedemann, J.: Wind noise source filtering and transmission study through a side glass of DrivAer model. *Applied Acoust.* 160, 107161 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107161>
6. He, Y., Wan, R., Liu, Y., Wen, S., Yang, Z.: Transmission characteristics and mechanism study of hydrodynamic and acoustic pressure through a side window of DrivAer model based on modal analytical approach. *J. Sound Vib.* 501, 116058 (2021a)
7. He, Y., Wen, S., Liu, Y., Yang, Z.: Wind noise source characterization and transmission study through a side glass of DrivAer model based on a hybrid DES/APE method. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Auto-mob. Eng.* 235, 1757–1766 (2021b)
8. Menter, F.R., Hüppe, A., Flad, D., Garbaruk, A.V., Matyushenko, A.A., Stabnikov, A.S.: Large Eddy simulations for the Ahmed car at 25° slant angle at different Reynolds numbers. In: *Flow Turbulence and Combustion*. Springer Science and Business Media LLC (2023)
9. Page, G.J., Walle, A.: Towards a standardized assessment of automotive aerodynamic CFD prediction capability—AutoCFD 2: Windsor Body Test Case Summary. In: *SAE Technical Paper Series. WCX SAE World Congress Experience*. SAE International (2022)
10. Read, C., Viswanathan, H.: An aerodynamic assessment of vehicle-side wall interaction using numerical simulations. *Int. J. Autom. Mech. Eng.* 17, 7587–7598 (2020). <https://doi.org/10.15282/ijame.17.1.2020.08.0563>
11. Su, X., He, K., Xu, K., Gao, G., Krajnović, S.: Comparison of flow characteristics behind squareback bluff bodies with and without wheels. *Phys. Fluids* 35, 035114 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0138305>
12. Viswanathan, H.: Aerodynamic performance of several passive vortex generator configurations on an Ahmed body subjected to yaw angles. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02850-8>
13. Viswanathan, H., Chode, K.K.: The influence of forebody topology on aerodynamic drag and aeroacoustics characteristics of Squareback Vehicles using CAA. In: *Aerovehicles 5*, Poitiers, France, 12–14 June 2023. Available from: <https://shura.shu.ac.uk/id/eprint/32049> (2023)
14. Wang, Y., Thompson, D., Hu, Z.: Numerical investigations on the flow over cuboids with different aspect ratios and the emitted noise. *Phys. Fluids* 32, 025103 (2020)
15. Wang, D., Sun, M., Shen, X., Chen, A.: Aerodynamic characteristics and structural behavior of sound barrier under vehicle-induced flow for five typical vehicles. *J. Fluids Struct.* 117, 103816 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103816>
16. Shashurin, A.E.; Vasiliev, V.A. Methodology for estimating the acoustic field from the motor transport flow // *Izvestia Tula State University. Technical sciences.* - 2023. - N 8. - C. 601-611.
17. Shashurin A.E. Reduction of internal noise by soundproofing cabins: using the example of road construction machines: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences // Saint Petersburg: BSTU (VOENMEH), 2010. - P. 182
18. Sound-absorbing panel for noise protection structure Shashurin A.E., Zapletnikov I.N., Kirichenko V.A., Ivanov N.I., Buzhinsky K.V., Svetlov V.V., Boyko Yu.S. Utility model

patent RU 171794 U1, 06/16/2017. Application No. 2016141361 dated 10/20/2016.

19. Vasiliev, V.A. Problem of a choice of an acoustic center of a motor transport flow (in Russian) // Noise Theory and Practice. -2022. -N 8 (3). -С. 34-42.

20. Vasilyev V.A., Ksenofontova V.K. Highway Traffic Noise // Noise Theory and Practice. - 2020. - V. 6. N 1. - pp. 66-76.

21. Sannikov V.A., Drozdova L.F., Kudaev A.V. Determination of structural noise generated by vibrations of a separate car interior panel // Noise Theory and Practice. - 2020. - V. 6. N 4. - pp. 148-154