

## РАСЧЁТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

© 2017

**В. В. Галевко** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Детали машин и ТММ»; Московский автомобильно-дорожный институт; [galewkow@mail.ru](mailto:galewkow@mail.ru)

**Р. И. Рахматов** аспирант кафедры «Детали машин и ТММ»; Московский автомобильно-дорожный институт; [rahmatov\\_ri@mail.ru](mailto:rahmatov_ri@mail.ru)

Описана расчётно-экспериментальная методика проектирования конструкций системы обработки отработавших газов (СООГ) грузового автомобиля на основе конечно-элементного моделирования и результаты расчётно-экспериментальных исследований. Приведены результаты исследований, в том числе в виде распределения звукового давления по внутреннему объёму, разработанных конструкций СООГ. Выбрана конструкция глушителя-нейтрализатора с наилучшими виброакустическими характеристиками, которая изготовлена и испытана на грузовом автомобиле. Приведены результаты расчётно-экспериментальных исследований глушителя-нейтрализатора.

*Система обработки отработавших газов; каталитический блок; конечно-элементное моделирование; глушитель-нейтрализатор.*

---

*Цитирование:* Галевко В.В., Рахматов Р.И. Расчётное и экспериментальное исследование систем обработки отработавших газов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 3. С. 145-154. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-145-154

### Введение

В настоящее время требования к внешнему шуму автотранспортных средств (АТС) ужесточаются. Основным источником шума работающего двигателя остаётся шум выпуска, причём акустическая мощность незаглушённого шума выхлопа достигает 100 Вт (до 140 дБА) и в десятки и сотни раз превосходит мощности шума остальных элементов и систем двигателя. Автомобиль с установленным на нём двигателем должен соответствовать действующим нормативам по шуму, которые в Европе и России регулируются Правилами ЕЭК ООН № 51 с поправкой 02. Для достижения требуемых уровней внешнего шума АТС необходимо разрабатывать современные малошумные СООГ, удовлетворяющие требованиям по токсичности и противодавлению.

### Постановка задачи

Диапазон конструктивных решений СООГ очень широк и определяется как компоновочными ограничениями, так и необходимостью применять в СООГ различные виды нейтрализаторов.

Рассмотрим параметры оценки качества глушителя, которыми должен руководствоваться разработчик при создании СООГ автомобиля. Прежде всего, это обеспечение надёжности и ресурса системы, работающей в условиях агрессивной среды выхлопных газов высокой температуры, движущихся с высокой скоростью, при широком диапазоне температурных, влажностных и других условий. При этом необходимо обеспечить ограничения по противодавлению, создаваемому СООГ, которое отрицательно сказывается на мощностных параметрах двигателя. Необходимо также обеспечить рабочие условия для нейтрализаторов. И, конечно, СООГ должна обеспечить выполнение

основного требования: снижение шума выпуска, который не должен вносить заметного вклада в общий уровень шума автомобиля.

Из акустики известно, что вклад одного из источников шума в общий шум признается несущественным, если его уровень на 10 дБ и более ниже уровня общего шума. Максимальные значения звукового давления автомобиля задаются Правилами ЕЭК ООН № 51-02. По методике испытаний измерения проводятся на расстоянии 7,5 м от оси движущегося с разгоном автомобиля.

Для выделения шума выпуска из общего шума автомобиля измерения в соответствии с приложением 3 Правил 51-02 проводятся на расстоянии 0,5 м от среза выпускной трубы. Измеренный в этой точке уровень шума  $P_{0,5}$  можно пересчитать на расстояние 7,5 м с учётом его снижения на  $\Delta P$ :

$$\Delta P = 20 \log(7,5 / 0,5) = 23,5 \text{ дБ.}$$

Таким образом, шум от среза выпускной трубы на расстоянии 7,5 м будет на 23,5 дБ меньше, чем на расстоянии 0,5 м. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке влияния шума от среза выпускной трубы на общий шум автомобиля.

Для оценки эффективности работы как всей системы выпуска, так и её отдельных элементов наиболее информативным параметром является потеря передачи TL (Transmission Loss), так как он не зависит от акустических условий на входе и выходе системы выпуска:

$$TL = 10 \lg(W_{in} / W_{out}),$$

где  $W_{out}$  и  $W_{in}$  – мощности звуковых волн соответственно на входе и выходе глушителя при согласованной входной и выходной нагрузке.

### **Методика и результаты проектирования СООГ грузового автомобиля**

Для создания трёхмерных КЭМ СООГ используется программный комплекс ANSYS [1; 2]. Конечно-элементное моделирование позволяет провести с учётом граничных условий анализ необходимого числа конструкций СООГ и по виброакустическим показателям отобрать наиболее эффективные.

Исходя из габаритно-компоновочных ограничений были выбраны три конструкции СООГ. На рис. 1 показаны конструктивные схемы глушителя-нейтрализатора для грузового АТС.

Конструкция СООГ (рис. 1, а) состоит из входного патрубка с конусом 1, каталитического блока 2, выходного конуса с патрубком 3, внешней объёмной камеры 5, внутренней объёмной камеры 4 и выходного патрубка 6. Выпускной коллектор двигателя соединяется с СООГ через впускной патрубок 1. На рисунке 1, б представлена конструкция СООГ с дополнительной объёмной камерой 7, соединённой с камерой 5 посредством технологических отверстий 8.

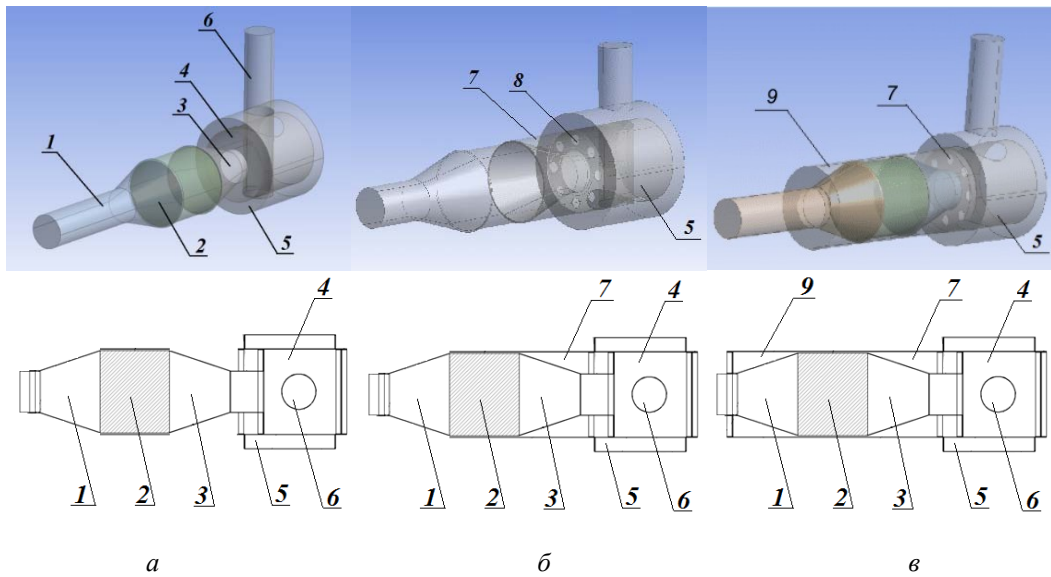


Рис. 1. Конструкции СООГ: а – с двумя объёмными камерами; б – с тремя объёмными камерами; в – с четырьмя объёмными камерами

На рис. 1, в представлена конструкция СООГ с дополнительной объёмной камерой 9, состоящей из объёма между наружным корпусом глушителя-нейтрализатора, входным и выходным конусами, внешней поверхностью каталитического блока. Камера 9 связана с камерой 7 посредством цилиндрического зазора между корпусом и каталитическим блоком 2.

Были созданы конечно-элементные модели (КЭМ) для рассматриваемых конструктивных схем. Разбиение на конечные элементы выполнено в программном комплексе Ansys и экспортировалось в LMS Sysnois. Метод конечно-элементного моделирования СООГ основан на представлении исследуемых конструкций в виде газового объёма, заполняющего всю конструкцию и разбитого на множество дискретных объёмов – конечных элементов, аппроксимирующих геометрическую форму конструкции.

На рис. 2 представлены импортированные из Ansys модели первых двух вариантов СООГ, приведённых соответственно на рис.1, а и б.

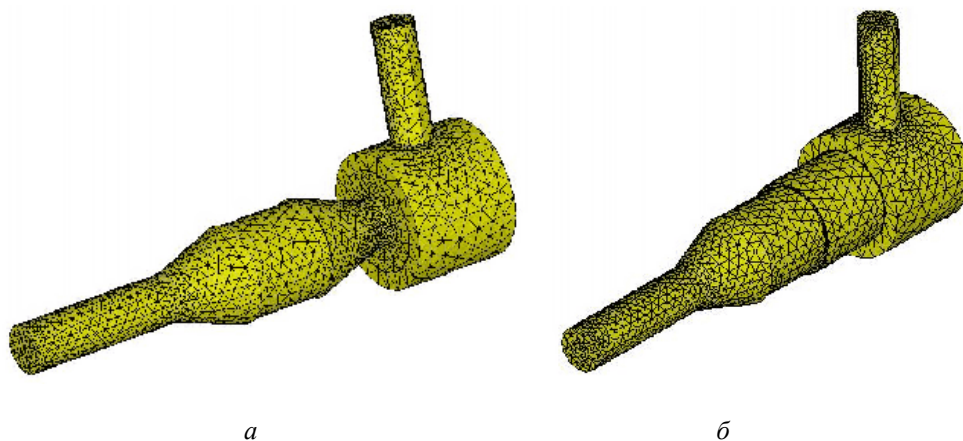
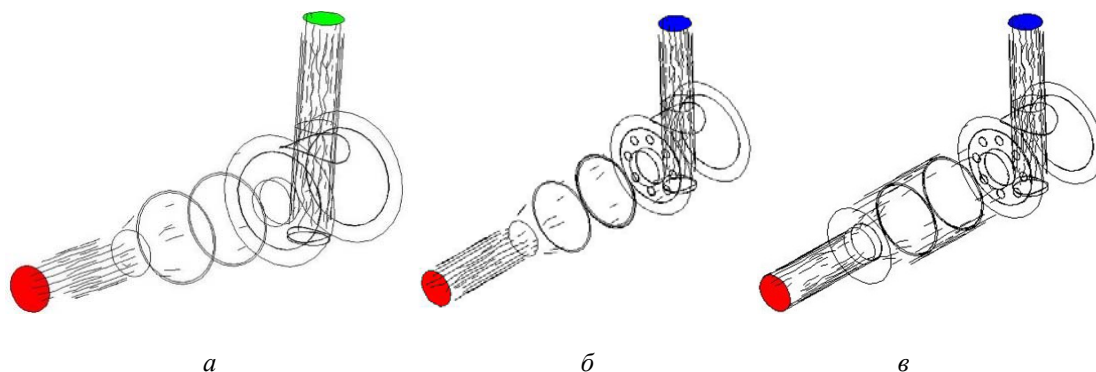


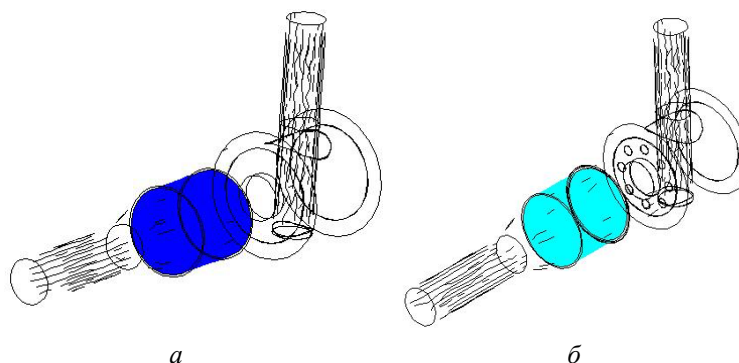
Рис. 2. КЭМ конструкции СООГ: а – с двумя объёмными камерами; б – с тремя объёмными камерами в программном комплексе LMS Sysnois

Для расчёта в программном комплексе Sysnois задаём граничные условия: на входе – поршневое возбуждение, на выходе – согласованная нагрузка (рис. 3).



*Рис. 3. Граничные условия конструкции СООГ: а – с двумя объёмными камерами; б – с тремя объёмными камерами; в – с четырьмя объёмными камерами*

Отметим, что параметры плотности и скорости распространения звука в каталитическом блоке были определены расчётно-экспериментальным способом по разработанной методике и использованы для проектирования и расчёта трёх конструкций СООГ (рис. 4).



*Рис. 4. Граничные условия для каталитического блока конструкции СООГ: а – с двумя объёмными камерами; б – с тремя объёмными камерами*

На рис. 5 представлены распределения звукового давления по объёму СООГ первой конструкции на частоте  $f = 250$  Гц.

Из него следует, что стоячие волны образуются по всей длине СООГ. Длина этих волн равна

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340 \text{ м/с}}{250 \text{ Гц}} = 1,36 \text{ м}.$$

Переменное избыточное давление, возникающее во входной трубе, продолжается до 2/3 её длины. Изменения значения звукового давления в точке перехода от входного патрубка до входного конуса ощутимы и продолжают уменьшаться до половины длины конуса, что свидетельствует об уменьшении пучностей и увеличении интенсивности распространения волны по длине конуса, которое продолжается до 1/3 длины каталитического блока.

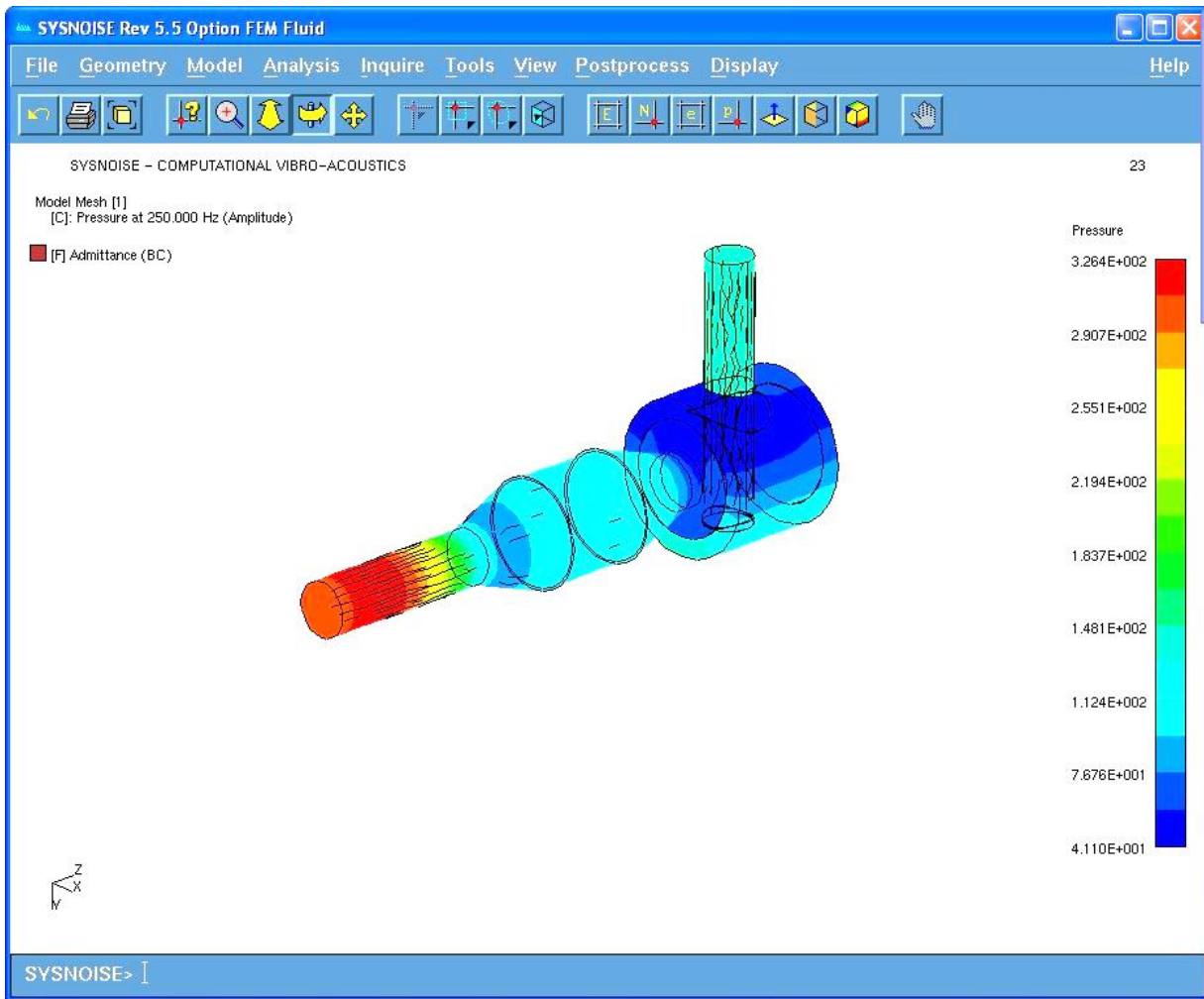


Рис. 5. Распределение звукового давления по объёму глушителя-нейтрализатора первой конструкции на частоте 250 Гц

Так как каталитический блок состоит из большого количества сот-ячеек, то распространяющиеся звуковые волны частично поглощаются на средних и высоких частотах. Поэтому каталитический блок выступает как диссипативный элемент с низким коэффициентом поглощения. Далее происходит увеличение звукового давления до  $2/3$  длины каталитического блока. Возрастание звукового давления продолжается и по  $1/2$  длине соединительной трубы – между выпускным конусом и второй объёмной камерой. От второй половины трубы до второй объёмной камеры (включая первую объёмную камеру) наблюдается резкое уменьшение звукового давления. По конструкции СООГ второй объём соединён с выпускной трубой.

Для выбора наименьшего значения звукового давления на выходе из СООГ необходимо конструировать выпускную трубу в зоне наименьшего значения звукового давления во второй объёмной камере.

На рис. 6 представлены распределения звукового давления по объёму СООГ второй конструкции на частоте 1500 Гц.

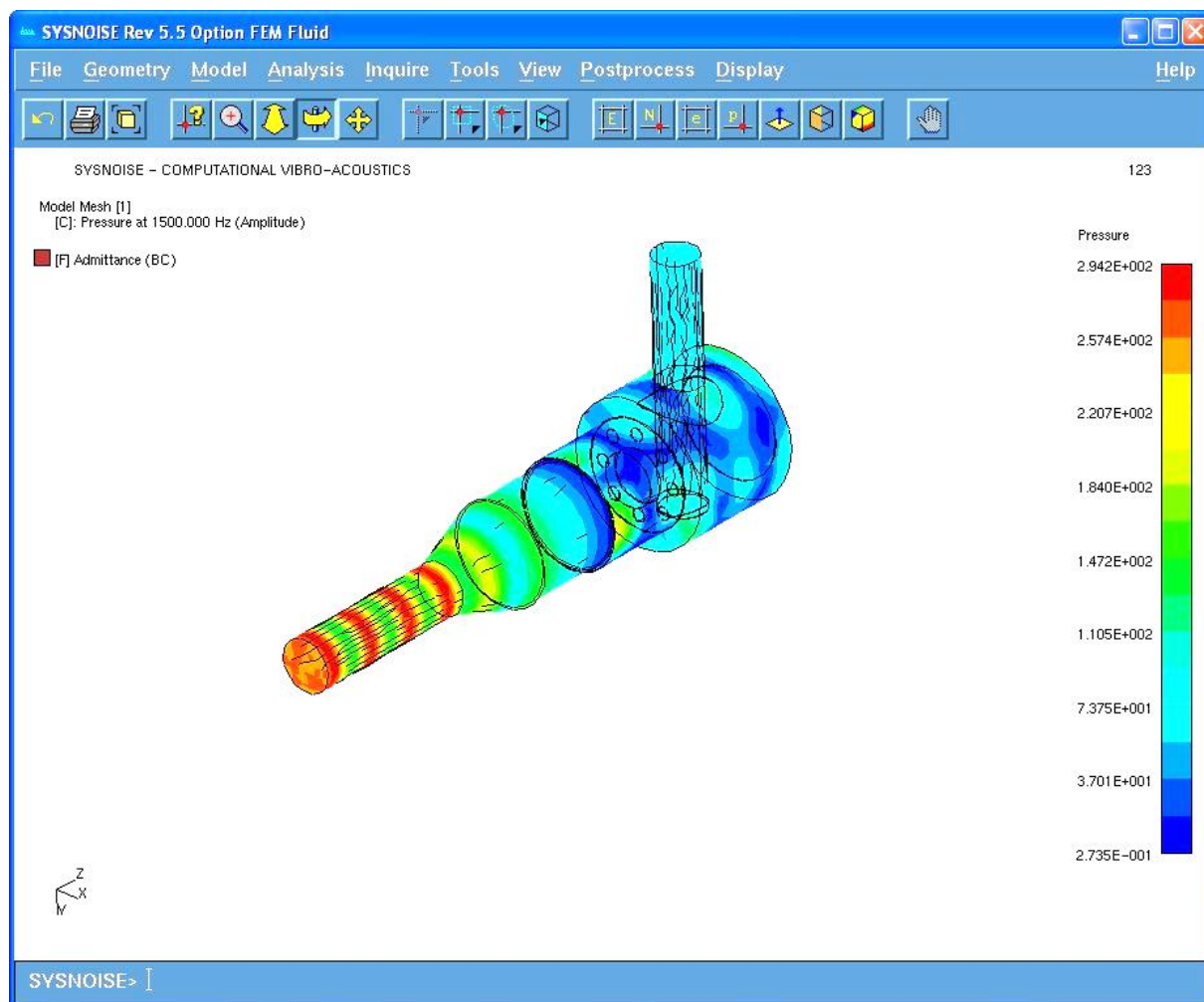


Рис. 6. Распределение звукового давления по объёму глушителя-нейтрализатора второй конструкции на частоте 1500 Гц

Из рис. 6 следует, что стоячие волны образуются по всей длине входного патрубка конструкции СООГ. Длина этих волн равна:

$$\lambda = \frac{g}{f} = \frac{340 \text{ м/с}}{1500 \text{ Гц}} = 0,23 \text{ м}.$$

Переменное избыточное давление, возникающее во входной трубе, продолжается до её соединения с входным конусом. Уменьшение значения звукового давления начинается с начала длины входного конуса до выпускной трубы, что свидетельствует об уменьшении пучностей и увеличении интенсивности распространения волны по длине выпускной трубы. Для выбора наименьшего значения звукового давления на выходе из СООГ необходимо конструировать выпускную трубу в зоне наименьшего значения звукового давления в третьей объёмной камере.

На рис. 7 представлены распределения звукового давления по объёму СООГ третьей конструкции на частоте 2500 Гц.



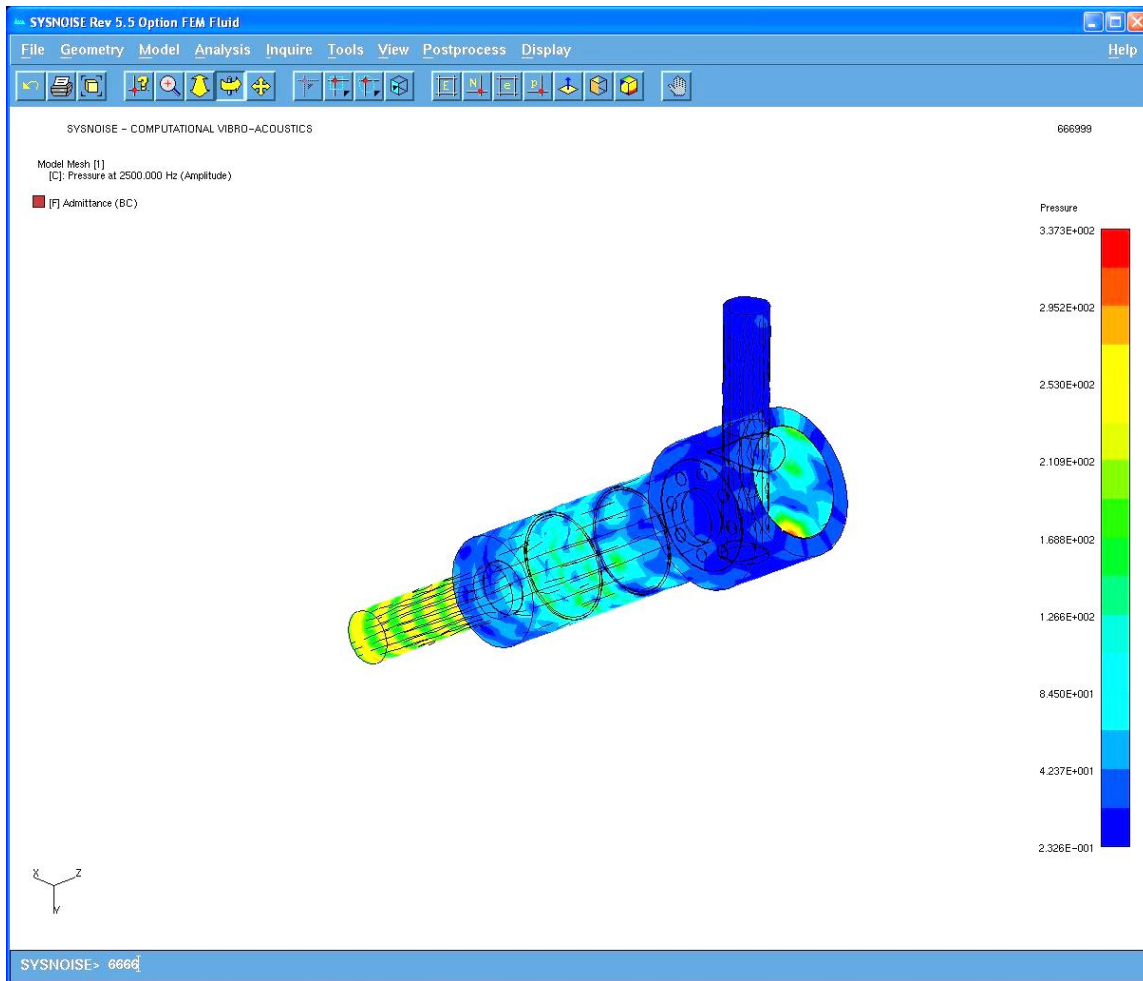


Рис. 7. Распределение звукового давления по объёму глушителя-нейтрализатора третьей конструкции на частоте 2500 Гц

Из рис. 7 следует, что стоячие волны образуются по всей длине входного патрубка конструкции СООГ. Длина этих волн равна

$$\lambda = \frac{g}{f} = \frac{340 \text{ м/с}}{2500 \text{ Гц}} = 0,136 \text{ м.}$$

Изменения значений звукового давления на участке от входного конуса до выходного конуса ощутимы и продолжают уменьшаться, что свидетельствует об уменьшении пучностей и увеличении интенсивности распространения волны. Для выбора наименьшего значения звукового давления на выходе из СООГ необходимо конструировать выпускную трубу в зоне наименьшего значения звукового давления в третьей или четвертой объёмной камере.

Из картин распределения звукового давления в объёмах конструкций СООГ видно, что на каждой частоте образуется характерное распределение максимумов и минимумов, образованное стоячей волной, как во входном трубопроводе, так и в самом объёме каждой конструкции СООГ.

На рис. 8 представлен параметр потери передачи TL (дБ) в зависимости от частоты. Три конструкции СООГ представлены на графике в следующем порядке: Ver\_1 – первая конструкция (рис. 1, а); Ver\_2 – вторая конструкция (рис. 1, б); Ver\_3 – третья конструкция (рис. 1, в).

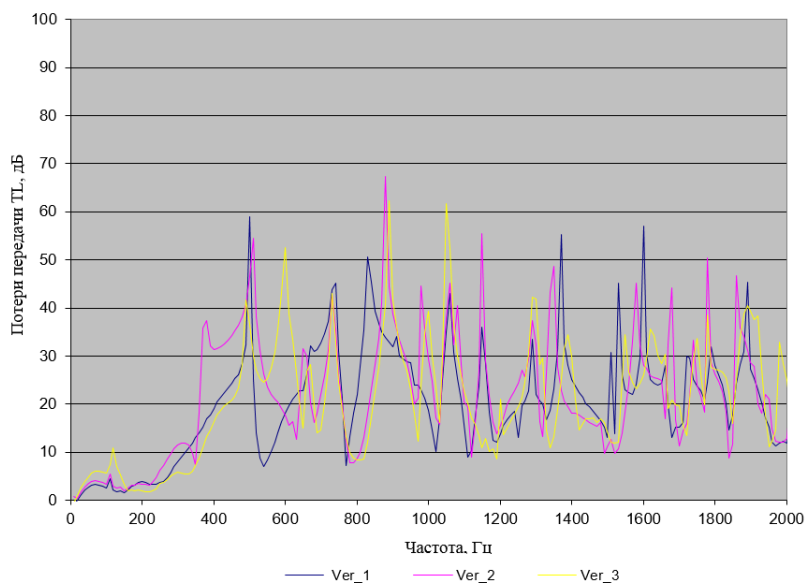


Рис. 8. Результаты расчёта спектров потери передач для трёх конструкций СООГ

Как следует из приведённых результатов, в средне- и высокочастотном диапазоне все конструкции имеют примерно одинаковую среднюю эффективность 20-40 дБ, которая достаточна для эффективной работы СООГ. Можно отметить, что при необходимости эффективность в этих диапазонах можно повысить известным решением – добавлением диссипативных элементов в виде звукопоглощающих материалов из базальтового или стекловолокна. В низкочастотном диапазоне эти материалы работают неэффективно и повысить акустическую эффективность можно за счёт изменения конструкции СООГ.

Эффективность снижения звукового давления на частотах до 150 Гц обеспечивает третья конструкция глушителя-нейтрализатора за счёт работы четвёртой объёмной камеры (рис. 1, в).

Была изготовлена третья конструкция глушителя-нейтрализатора и её эффективность была оценена на грузовом автомобиле.

Испытания глушителя-нейтрализатора в сравнении с серийным глушителем проводились в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 41.51-2004 на полигоне ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Результаты измерений приведены на рис. 9, 10.

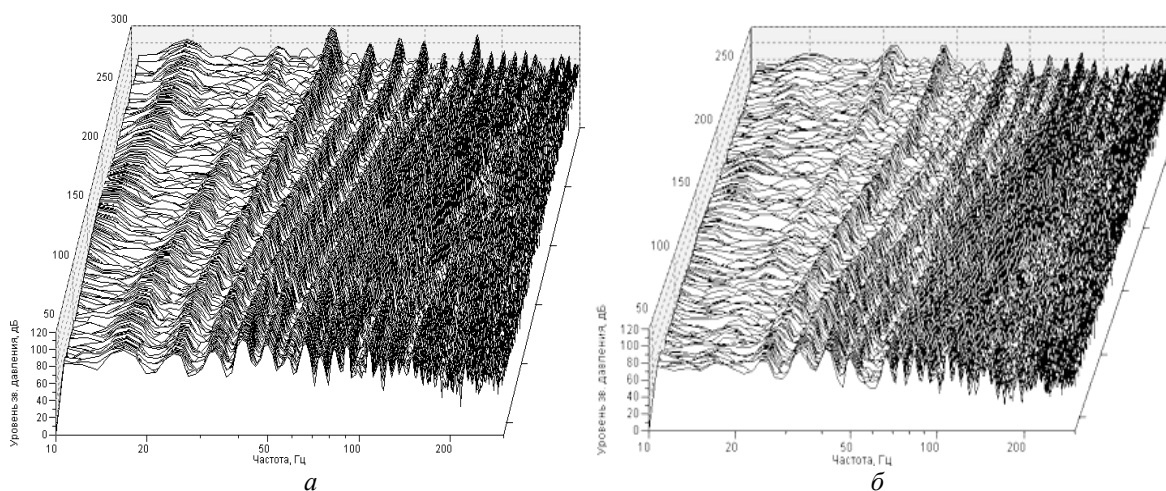


Рис. 9. Уровни звукового давления на срезе выпускной трубы серийного глушителя (а) и глушителя-нейтрализатора (б)



Из рис. 9 следует, что на всех скоростных режимах работы двигателя в низкочастотной области до 150 Гц спектральные составляющие при установке глушителя-нейтрализатора значительно ниже, чем при серийном глушителе.

На рис. 10 показаны спектры шума глушителя-нейтрализатора и серийного глушителя при работе двигателя с полной нагрузкой и частотой вращения коленчатого вала 2000 мин<sup>-1</sup>.

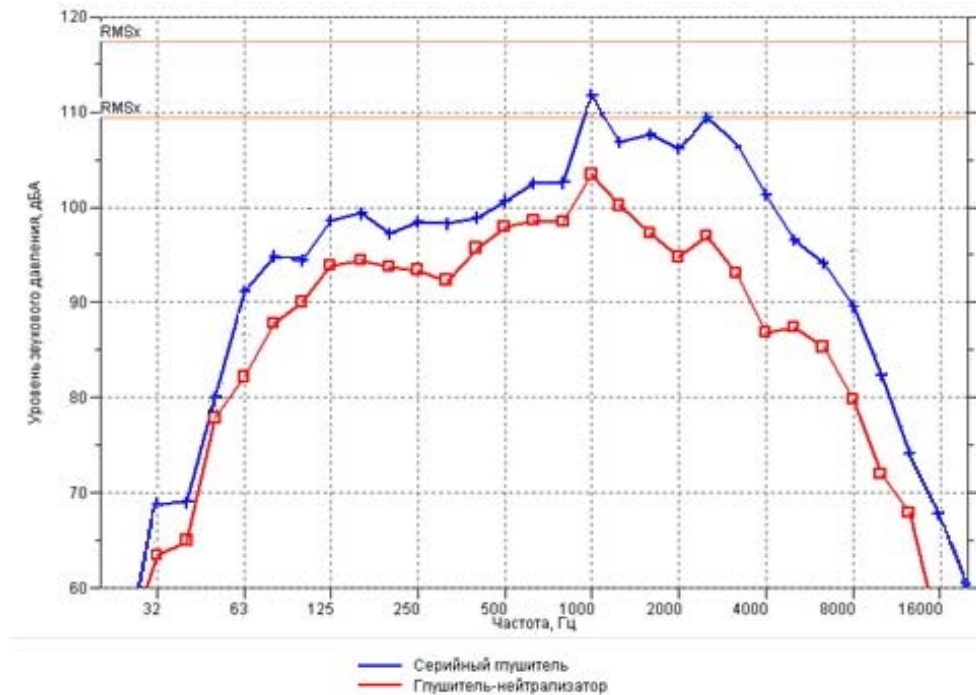


Рис. 10. Уровни звукового давления на срезе выпускной трубы серийного глушителя (а) и глушителя-нейтрализатора (б)

Максимальное значение звукового давления на частоте 1000 Гц составило у серийного глушителя 113 дБ, а у глушителя-нейтрализатора – 104 дБ. В низкочастотной области уровни звукового давления у глушителя-нейтрализатора на 2-11 дБ ниже, чем у серийного глушителя. В средне- и высокочастотном диапазоне снижение звукового давления у глушителя-нейтрализатора составляет 9–20 дБ.

### Заключение

Разработанная расчётно-экспериментальная методика проектирования и исследования конструкций СООГ автотранспортных средств на основе конечно-элементного моделирования позволяет спроектировать конструкцию СООГ с необходимыми виброакустическими параметрами.

### Библиографический список

1. Басов К.А. ANSYS для конструкторов. М.: ДМК Пресс, 2009. 238 с.
2. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. М.: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.
3. Галевко В.В., Рахматов Р.И. Конструктивные решения по снижению звукового излучения от наружных поверхностей СООГ // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2016. № 3 (46). С. 3-10.

4. Галевко В.В., Надарейшвили Г.Г., Юдин С.И. Совершенствование методики расчётно-экспериментального определения акустических характеристик элементов системы выпуска // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 3 (25). С. 124-127.

5. Рахматов Р.И., Галевко В.В. Разработка конечно-элементных моделей и расчётно-экспериментальное исследование систем обработки отработавших газов // Научное обозрение. 2015. № 22. С. 129-135.

## COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF EXHAUST GAS TREATMENT SYSTEMS

© 2017

**V. V. Galevko** Candidate of Science (Engineering); Associate Professor; Department of Machine Components and Theory of Machines and Mechanisms; Moscow Automobile and Highway State University, Moscow, Russian Federation; [galewkow@mail.ru](mailto:galewkow@mail.ru)

**R. I. Rakhmatov** postgraduate student; Department of Machine Components and Theory of Machines and Mechanisms; Moscow Automobile and Highway State University, Moscow, Russian Federation; [rahmatov\\_ri@mail.ru](mailto:rahmatov_ri@mail.ru)

The authors describe a calculation-experimental technique for the development and design of truck-based exhaust gas treatment systems on the basis of finite element modeling. The results of calculation and experimental research are presented, including distribution of sound pressure in the internal volume of the developed design of exhaust system. The design of a catalytic silencer with the best vibroacoustic characteristics was selected and tested on a truck.

*Exhaust system; catalyst unit; finite element modeling, catalytic silencer.*

---

*Citation:* Galevko V.V., Rakhmatov R.I. Computational and experimental research of exhaust gas treatment systems. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 3. P. 145-154.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-145-154

### References

1. Basov K.A. *ANSYS dlya konstruktorov* [ANSYS for designers]. Moscow: DMK Press Publ., 2009. 238 p.
2. Basov K.A. *ANSYS v primerakh I zadachakh* [ANSYS in examples and problems]. Moscow: Komp'yuter Press Publ., 2002. 224 p.
3. Galevko V.V., Rakhmatov R.I. Constructive solutions to reduce sound radiation from surface JBSO. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (MADI)*. 2016. No. 3 (46). P. 3-10. (In Russ.)
4. Galevko V.V., Nadarejshvili G.G., Yudin S.I. Improvement of calculation and experimental method of determination of acoustic characteristics of the exhaust system elements. *Vector Nauki of Togliatti State University*. No. 3 (25). P. 124-127. (In Russ.)
5. Galevko V.V., Rakhmatov R.I. Development of finite element models and computational and experimental investigation of exhaust gas processing systems. *Science Review*. No. 22. P. 129-135. (In Russ.)