

УДК 534.833.5

Расчетная доводка акустических характеристик системы выпуска двигателя внутреннего сгорания с учетом потока отработавших газов

Коньшина Алевтина Сергеевна^(*)

alevtina.konshina@nami.ru

Юдин Станислав Иванович

stanislav.yudin@nami.ru

Надарейшвили Гиви Гурамович

givi.nadareishvili@nami.ru

ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

Аннотация. Приводятся результаты по акустической доводке системы выпуска отработавших газов (СВОГ) двигателя внутреннего сгорания V8, установленного на автомобиле серийного производства. Задача — снижение шума выпуска на режиме холостого хода (XX). В качестве исходных данных рассматривается измеренный спектр шума выпуска, а также приводится 3D модель и описание СВОГ. Расчеты проводились методом конечно-элементного моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics. Приведены результаты расчетов и всей СВОГ, и отдельных элементов как с учетом потока, так и без учета потока отработавших газов (ОГ). Определена причина повышенного шума выпуска в диапазоне частот спектра с максимальными амплитудами и необходимые действия — уточнение настройки резонаторов Гельмгольца, конструктивно входящих в средний глушитель СВОГ. Оценочные расчеты, учитывающие и измеренный спектр шума, и расчетные спектры акустической эффективности СВОГ, позволили сделать вывод о достижении интегральным уровнем шума целевых значений (ЦЗ) после уточнения настройки резонаторов.

Ключевые слова: система выпуска отработавших газов, шум выпуска, поток отработавших газов, метод конечно-элементного моделирования, резонатор Гельмгольца

Design tuning of acoustic characteristics of the exhaust system of internal combustion engine taking into account the flow of exhaust gases

Konshina Alevtina sergeevna^(*)

alevtina.konshina@nami.ru

Yudin Stanislav Ivanovich

stanislav.yudin@nami.ru

Nadareishvili Givi Guramovich

givi.nadareishvili@nami.ru

FSUE "NAMI", Moscow, Russia

Abstract. Results of design work on the acoustic refinement of exhaust system (SVOG) of the internal combustion engine V8 installed on a mass-produced car are given. The task is to reduce exhaust noise at idle. The measured emission noise spectrum is considered as input data, as well as a 3D model and a description of the SVOG. Calculations were carried out by finite element modeling in the software complex Comsol Multiphysics. The results of calculations of both the entire SVOG and individual elements are given, both taking into

account the flow and excluding the flow of exhaust gases. The reason for the increased exhaust noise in the frequency range of the spectrum with maximum amplitudes and the necessary actions were determined — clarification of the settings of Helmholtz resonators structurally included in the middle silencer. Evaluation calculations, taking into account both the measured noise spectrum and the calculated acoustic efficiency spectra of SVOG, made it possible to conclude that the integral noise level reached the target values after refining the resonator settings.

Keywords: exhaust system, exhaust noise, exhaust flow, finite element modeling, Helmholtz resonator

Введение. При разработке и доводке систем выпуска широко применяются программные продукты, позволяющие методом конечно-элементного моделирования определять акустические, газодинамические и другие параметры СВОГ. Для получения результатов, максимально приближенных к результатам реальных дорожных испытаний СВОГ на автомобиле, необходимо учесть все особенности проведения расчетов и задать правильные начальные, граничные и другие параметры. Расчеты проводились в программном комплексе Comsol Multiphysics [1] на конкретном примере акустической доводки СВОГ. Рассматривается режим ХХ, на котором ярко проявляется вклад в шум выпуска низкочастотных оборотных гармоник работы двигателя.

На рис. 1 приведены измеренные спектры шума выпуска V-образного 8-цилиндрового двигателя на режиме ХХ (обороты 750 1/мин), установленные на двух автомобилях с одинаковыми двигателями.



Рис. 1. Спектры шума выпуска на режиме ХХ, дБА

Обороты ХХ — 750 мин⁻¹, соответственно в спектре выделяются по амплитуде четвертая и восьмая оборотные гармоники двигателя V8 — 50 Гц и 100 Гц. Однако преобладающий по уровню диапазон частот — в районе

170 Гц. Можно также отметить, что на режиме XX интегральный уровень шума выпуска определяется составляющими спектра до 200 Гц, более высокочастотные шумы на 15-20 дБ меньше по амплитуде. Расчеты проводятся методом конечно-элементного моделирования акустических и газодинамических процессов в системе выпуска. СВОГ двигателя V8 представляет из себя параллельную схему из двух симметричных веток, включающие «горячую часть» (выпускные каналы головки блока цилиндров, выпускной коллектор, турбокомпрессор, стартовый и основной каталитические блоки) и «холодную часть», включающую глушитель и общий резонатор. На рисунке 2 приведена расчетная модель СВОГ — внутренний объем всех элементов и труб системы выпуска.

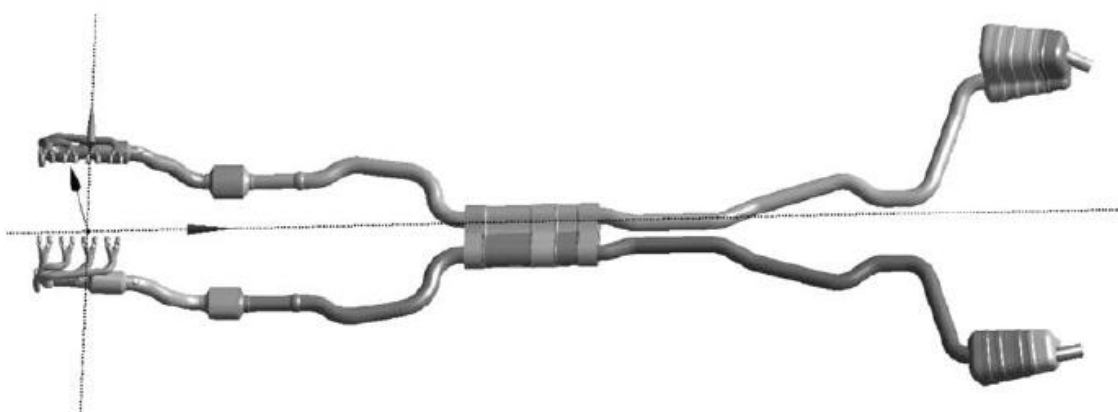


Рис. 2. Расчетная модель СВОГ

СВОГ симметрична относительно плоскости XZ и все расчеты можно проводить только на одной части модели, что подтверждено ранее проведенными расчетами и испытаниями [2]. В дальнейшем все результаты приводятся по расчетам одной ветви.

Акустическая эффективность СВОГ оценивается по спектру параметра «потери передачи» TL (Transmission Loss), который определяется как разность акустической энергии на входе и выходе системы [3]. Предварительные расчеты акустической эффективности проведены без учета потока, но с учетом температуры. Для этого предварительно проведены расчеты на газодинамической модели, в которой задавались входные условия в виде массового расхода и температуры ОГ на режиме XX.

Результаты расчета TL приведены на рис. 3. В спектре TL всей СВОГ (с учетом всех элементов) выделяется область в диапазоне 170...210 Гц с двумя пиками на краях этого диапазона. Это результат работы двух резонаторов Гельмгольца, встроенных в общий объем резонатора (среднего глушителя) системы выпуска и настроенных на две указанные частоты. Если из расчета исключить эти два резонатора Гельмгольца, в спектре присутствует большой провал в акустической эффективности около 170 Гц. Этот провал соответствует максимальным значениям в спектрах шума, отмеченным на рис. 1.

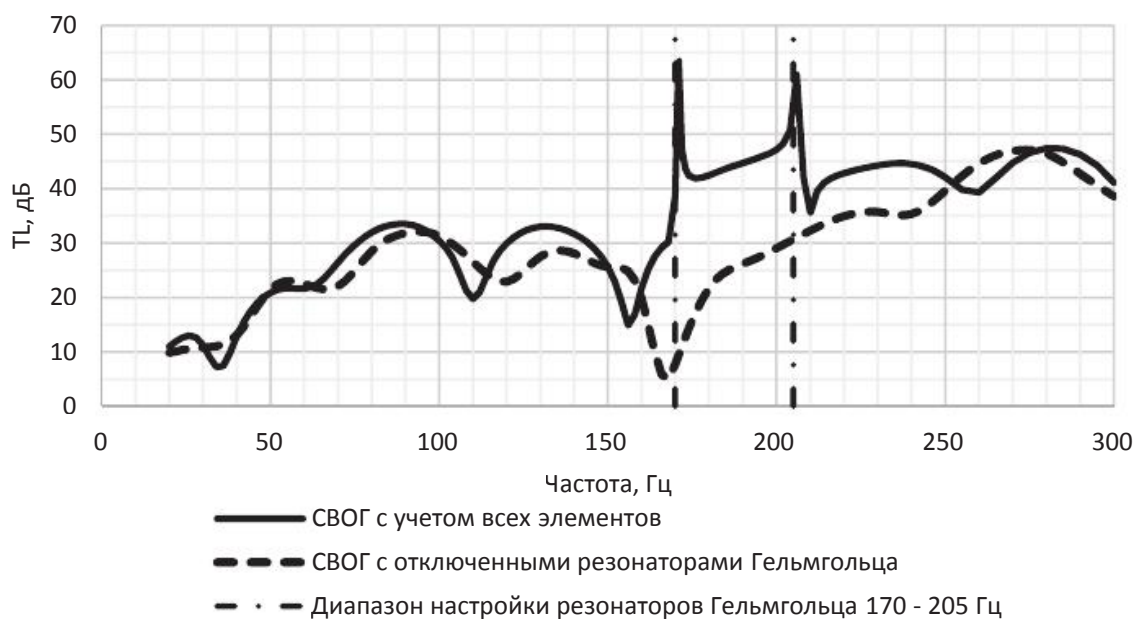


Рис. 3. Спектр TL СВОВ без учета потока с учетом температур

Анализ приведенных результатов показывает, что задачей снижения уровня шума выпуска является перенастройка резонаторов Гельмгольца на более низкочастотный диапазон.

Расчетная настройка резонаторов Гельмгольца. Программные особенности проведения акустических расчетов с учетом потока конструкций типа СВОВ в COMSOL Multiphysics предполагают исключение из расчетов входных и выходных элементов в связи с особенностями задания входных и выходных условий [4]: — на входе и выходе расчетной модели необходимо задать условия согласованной нагрузки и дополнительно на входе акустическое возбуждение; — для проведения газодинамических расчетов на входе и выходе должны быть прямые участки достаточной длины для формирования ламинарного потока; — для удовлетворения указанным требованиям согласованные нагрузки задаются в виде специальных отрезков волноводов достаточной длины PML (Perfectly Matched Layer). Расчетная модель СВОВ приобретает вид, представленный на рис. 4.



Рис. 4. Расчетная модель СВОВ без входных и выходных элементов.

Для анализа возможности проведения акустических расчетов СВОГ с учетом указанных ограничений необходимо рассмотреть результаты расчетов TL без учета потока ОГ в полном составе компонентов в сравнении с исключением указанных входных и выходных элементов. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

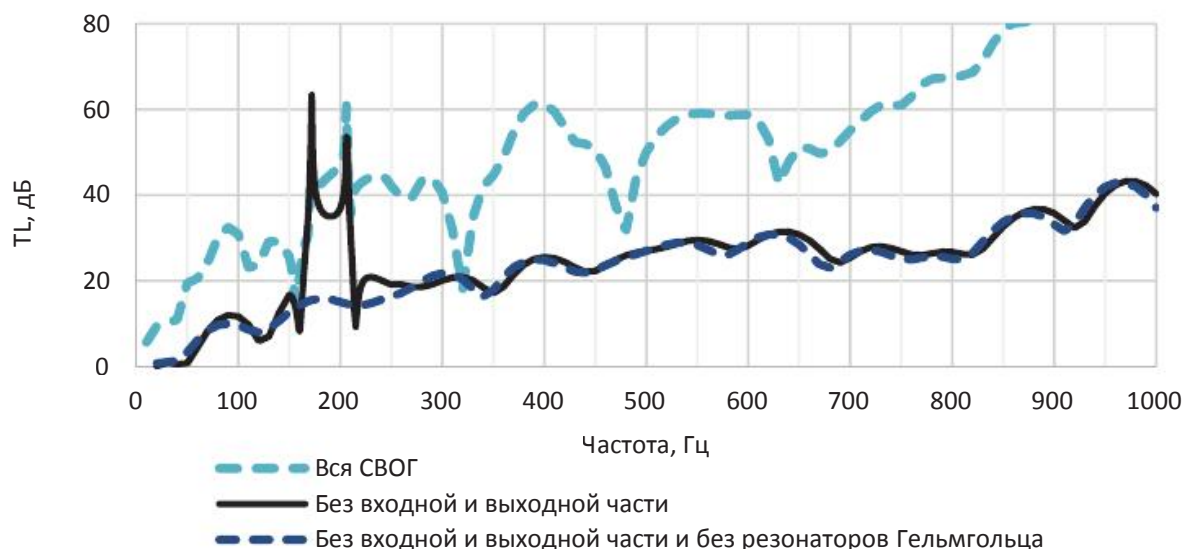


Рис. 5. Результаты расчета TL СВОГ без потока ОГ в различных комплектациях.

Как можно видеть, эффективность СВОГ с входной и выходной частью значительно превышает все остальные комплектации, за исключением диапазона частот настройки резонаторов Гельмгольца. Звуковая волна, отражаясь от входной, выходной части и других элементов СВОГ, многократно переотражаясь на границах скачка акустического импеданса, значительно затухает во всем диапазоне частот. А работа резонаторов Гельмгольца является определяющей и в полной комплектации СВОГ, что позволяет провести их расчетную настройку без учета влияния входной и выходной части. Далее результаты расчетов TL приводятся в этой комплектации СВОГ. На рис. 6 приведены расчетные спектры настройки резонаторов Гельмгольца с потоком и без потока.

Для настройки резонатора Гельмгольца необходимо определить спектр акустической эффективности в абсолютных единицах: так как спектр в единицах дБ при каждом расчете считался относительно входного сигнала, который задавался одинаковым в виде амплитуды звукового давления в 1 Паскаль, спектр эффективности резонаторов относительно «базы» (спектра СВОГ без резонаторов Гельмгольца) будет равен разности приведенных спектров. На рис. 7 приведены итоговые спектры акустической эффективности в единицах дБ относительно «базового» спектра. Центр полосы настройки начального варианта резонаторов — 190 Гц. По приведенной методике был определен и спектр резонатора с уточненной настройкой (в соответствии с рис. 3) — на 170 Гц.

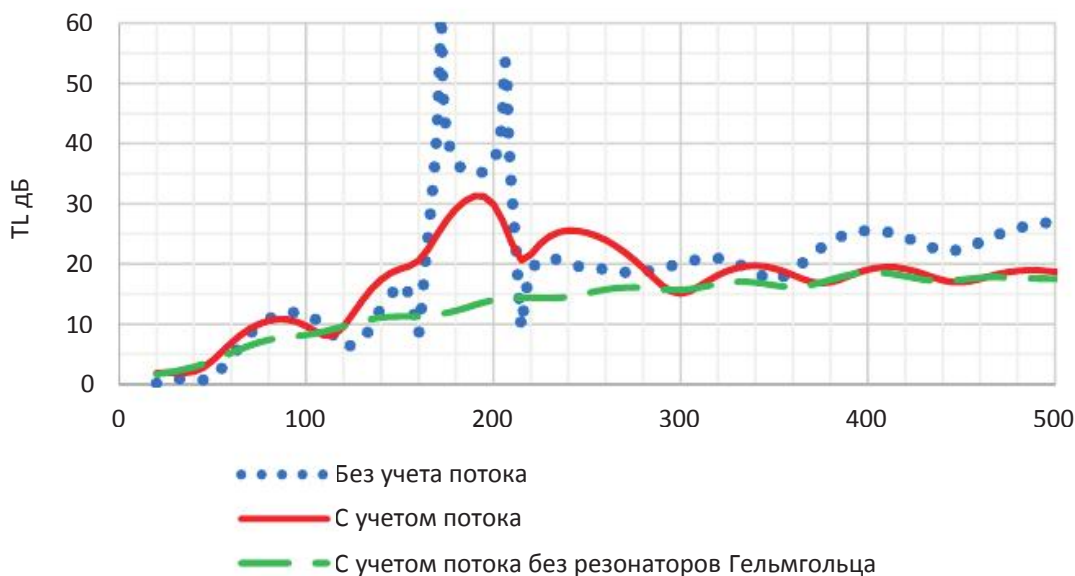


Рис. 6. Расчетные спектры начальной СВОГ

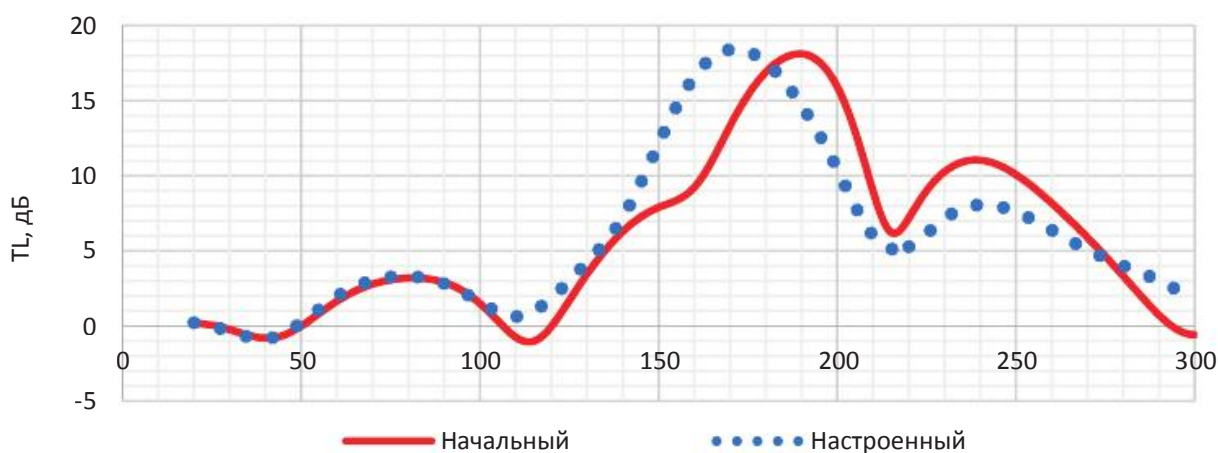


Рис. 7. Расчетный спектр акустической эффективности начального и настроенного резонаторов относительно «базового» уровня.

Поскольку спектры рассчитывались относительно «базового» уровня, можно оценить изменение спектра шума при работе резонаторов с уточненной настройкой. Для этого к спектру измеренного шума выпуска прибавляется спектр эффективности начального резонатора и вычитается спектр эффективности варианта с уточненной настройкой. На рис. 8 приведены результаты оценки спектра шума для резонатора с уточненной настройкой резонаторов Гельмгольца.

Максимальные составляющие уменьшились: на частоте 169 Гц на 5,5 дБ до **53,6** дБ; на частоте 162 Гц — на 7,4 дБ до **50,1** дБ. В диапазоне 150... 200 Гц оценка амплитуд — не более **53,1** дБ. Оставшиеся неизменными максимумы на 100 и 50 Гц (**57,0** и **55,0** дБ) позволяют оценить интегральный уровень не выше ЦЗ NVH на режиме XX (62 дБА).

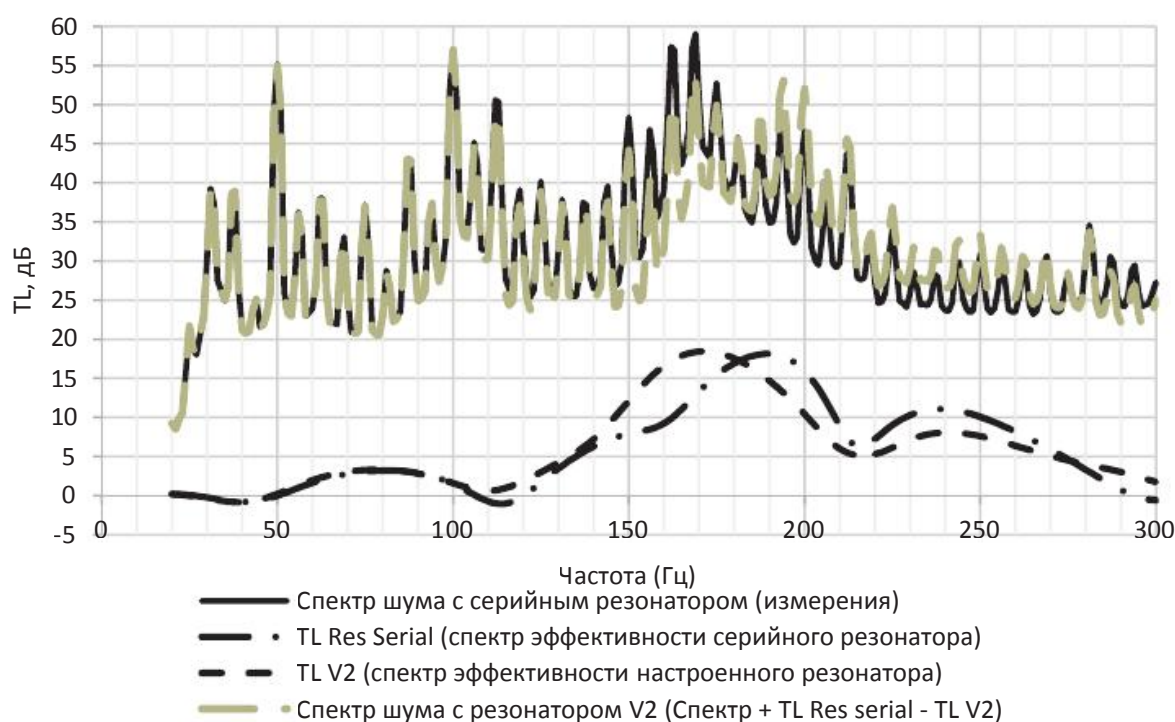


Рис. 8. Оценка спектра шума выпуска с настроенным резонатором.

Закключение Приведенные результаты расчетного моделирования спектра акустической эффективности СВОГ с учетом и без учета потока ОГ и с учетом распределения температуры ОГ позволяют провести расчетную доводку акустических характеристик СВОГ до требуемых значений по уровню шума выпуска.

Список источников

- [1] COMSOL 5.5 Acoustics Module User's Guide Pat number: CM020201. URL: <https://www.comsol.com/product-download/> (accessed 05.03.2026).
- [2] Коньшина А.С. и др. Расчетно-экспериментальные исследования настройки резонатора Гельмгольца при малых скоростях потока. *Noise Theory and Practice*, 2025, т. 11, № 3, с. 68–80.
- [3] Комкин А.И. *Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей шума с требуемыми характеристиками*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2012, 411 с.
- [4] Helmholtz Resonator with Flow: Interaction of Flow and Acoustics. URL: <https://www.comsol.com/model/download/737381/models.aco.helm> (accessed 05.03.2026).