

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ДЛЯ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА АВТОМОБИЛЯ

Л. С. Карнаухова, А. И. Комкин

*ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет им. Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор Н. С. Попов*

**Ключевые слова:** комбинированный глушитель; обобщенные потери передач; оптимизация; численное моделирование, шум.

**Аннотация:** Представлено практическое решение задачи по определению конфигурации комбинированного глушителя шума выпуска автомобиля с максимальной акустической эффективностью при заданном объеме с использованием интегрального показателя акустической эффективности. Оптимизация геометрических параметров глушителей шума на основе интегрального показателя акустической эффективности позволяет сократить затраты времени на подбор основных пространственных параметров и характеристик применяемых звукопоглощающих материалов перед началом численных расчетов.

### Введение

Шум автомобильного транспорта является одним из основных источников шумового загрязнения городов, особенно существенный вклад в общий уровень шума вносят грузовые автомобили. Вступившие в действие в 2016 году поправки серии 03 к Правилам ЕЭК ООН № 51, входящим в Технический регламент РФ «О безопасности колесных транспортных средств» [1], предписывают снижение допустимых уровней звука  $L_A$  последовательно в три этапа с 83 до 79 дБА для грузовых автомобилей, предназначенных для использования в условиях бездорожья (категория N3G, мощностью двигателя более 150 кВт). Снижение шума автомобилей невозможно без решения комплексной задачи по уменьшению шума от всех значимых источников структурного и газодинамического шума

---

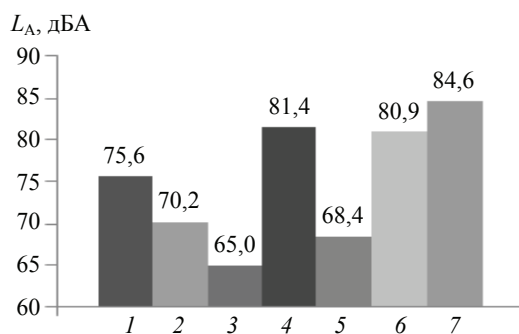
Карнаухова Любовь Сергеевна – ассистент кафедры «Экология и промышленная безопасность», e-mail: lyuba.vorobjeva@gmail.com; Комкин Александр Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность», ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия.

автомобиля, а также шума шин. Однако газодинамическая составляющая шума выпуска, измеренная на стороне выпуска при разгоне на 3-й передаче, является актуальным значимым источником для автомобилей с мощными двигателями (рис. 1).

В эпоху численного моделирования глушителей шума решение задачи по определению конфигурации комбинированного глушителя для систем выпуска с максимальной эффективностью при заданном ограниченном объеме является актуальным для исключения трудоемкого этапа интуитивного перебора конструктивных параметров глушителя.

Численные методы с использованием конечно-элементного моделирования находят все большее применение в работах по оптимизации конфигураций глушителей шум, дополняя аналитические методы расчета [2 – 4]. Однако такие методы позволяют решать только прямую задачу по определению акустических характеристик глушителей изначально заданных конфигураций. Решение обратной задачи по определению конфигурации глушителя с максимальной эффективностью при заданном объеме основано в цитируемых работах на использовании различных оптимизационных алгоритмов, направленных на максимизацию потерь передачи глушителя [5]. Иногда одновременно оптимизируют даже несколько параметров, включая не менее важные аэродинамические характеристики [6]. Однако все эти работы не учитывают форму спектра входного звукового давления, которая может быть учтена при использовании интегрального показателя акустической эффективности глушителей – обобщенных вносимых потерь, представленного в работе [9]. Пользуясь интегральным показателем акустической эффективности, при оптимизации геометрических параметров глушителей шума возможно сократить затраты времени на подбор основных пространственных параметров и характеристик применяемых звукопоглощающих материалов перед началом численного расчета.

Данная работа является практическим применением интегрального показателя акустической эффективности при оптимизации серийного комбинированного глушителя для системы выпуска грузового автомобиля.



**Рис. 1. Вклады различных источников шума автомобиля со стороны выпуска:**

1 – газодинамическая составляющая шума выпуска; 2 – шум, излучаемый от корпуса глушителя и раздаточной коробки; 3 – шум, проходящий через отверстия между экранами колесных шин и рамы; 4 – шум от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и коробки передач (КП), исходящий вниз автомобиля; 5 – акустическая эффективность звукопоглощающих материалов, установленных в моторном отсеке; 6 – шум, проникающий от наружных поверхностей ДВС и КП; 7 – расчетные уровни внешнего шума

## Принципы оптимизации конструкции глушителя заданного объема с использованием интегральных показателей

Чаще всего акустическая эффективность глушителя оценивается через потери передачи  $TL$  (англ. Transmission Loss), пропорциональные логарифму отношения звуковых мощностей падающей волны на входе в глушитель и выходной звуковой волны на выходе из глушителя, когда там располагается согласованная (безэховая) нагрузка. Однако потери передачи  $TL$  различных конструкций глушителей тяжело сравнить между собой.

Для сравнения различных конфигураций удобнее ввести интегральный показатель, выраженный одной цифрой, – обобщенные потери передачи глушителя  $OTL$  (англ. Overall Transmission Loss), который зависит не только от потери передачи  $TL$  глушителя, но также от формы спектра входного звукового давления и ширины рассматриваемого частотного диапазона [7].

Для камер расширения  $OTL$  тем больше, чем уже частотный диапазон и больше степени расширения камеры  $m = (r2/r1)^2$ , где  $r1$  и  $r2$  – радиусы поперечного сечения патрубка и камеры [7]. Когда же ограничены поперечные размеры камеры расширения и нет возможности задаться большими значениями  $m$ , то для повышения акустической эффективности камерного глушителя целесообразно делать его многосекционным.

Для диссипативных глушителей в низкочастотном диапазоне при ограничениях объема глушителя  $OTL$  увеличиваются с увеличением степени расширения глушителя и одновременным уменьшением длины глушителя [8]. В высокочастотном диапазоне и максимально широком диапазоне частот при ограничениях на объем глушителя, напротив, следует уменьшать степень расширения глушителя, одновременно увеличивая его длину.

Все вышеизложенные принципы верны для частного случая, когда спектр звукового давления падающей волны является белым шумом, то есть его энергия практически равномерно распределена по всем частотам.

Если же в качестве исходных данных использовать спектр незаглушенного шума, то есть звукового давления в точке на определенном расстоянии от среза выпускной трубы выпуска без глушителя, и сравнивать его со спектром, получаемым после установки глушителя, то придется говорить не о потерях передачи  $TL$ , а о вносимых потерях  $IL$  (англ. Insertion Loss). В этом случае для перехода от спектра к одной цифре и перевода ее единиц измерения из дБ в дБА, от вычислений  $OTL$  надо перейти к обобщенным  $IL$  –  $OIL$  (англ. Overall Insertion Loss) [9].

### Последовательность оптимизации конструкции заданного объема

Объем глушителя задан габаритами серийного глушителя: длиной глушителя  $l = 966$  мм и радиусом  $r2 = 137$  мм. Размер входного патрубка также неизменен,  $r1 = 55$  мм (рис. 2). Длина диссипативной секции,  $l1 = 515$  мм, может варьироваться.

Следуя представленным выше принципам, необходимо определить исследуемую ширину частотного диапазона, то есть определить диапазон частот, недостаточно заглушенный серийным глушителем. Для выяснения данного диапазона и последующего расчета  $OIL$  необходимо определить спектр незаглушенного шума (без глушителя), а затем сравнить его со спектром заглушенного шума выпуска (с серийным глушителем).

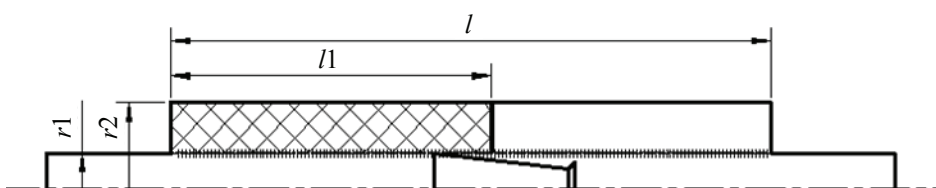


Рис. 2. Серийный глушитель выхлопа

Для определения спектра незаглушенного шума необходимо сложить известные измеренные уровни спектра заглушенного шума  $L$  (с серийным глушителем) с известными вносимыми потерями  $IL$  передачи серийного глушителя (рис. 3, *a*). Результат сложения, то есть искомый спектр незаглушенного шума  $L_{A0}$ , представлен на рис. 3, *б*.

Из анализа спектра незаглушенного шума выпуска можно сделать предположение, что акустическая эффективность серийного глушителя может быть повышена при дополнительном заглушении пика в районе 160 Гц, что может быть достигнуто введением в конструкцию резонатора Гельмгольца, настроенного на частоту 160 Гц. Но при неизменном объеме это приведет к сокращению длины оставшихся секций. Исходя из логики

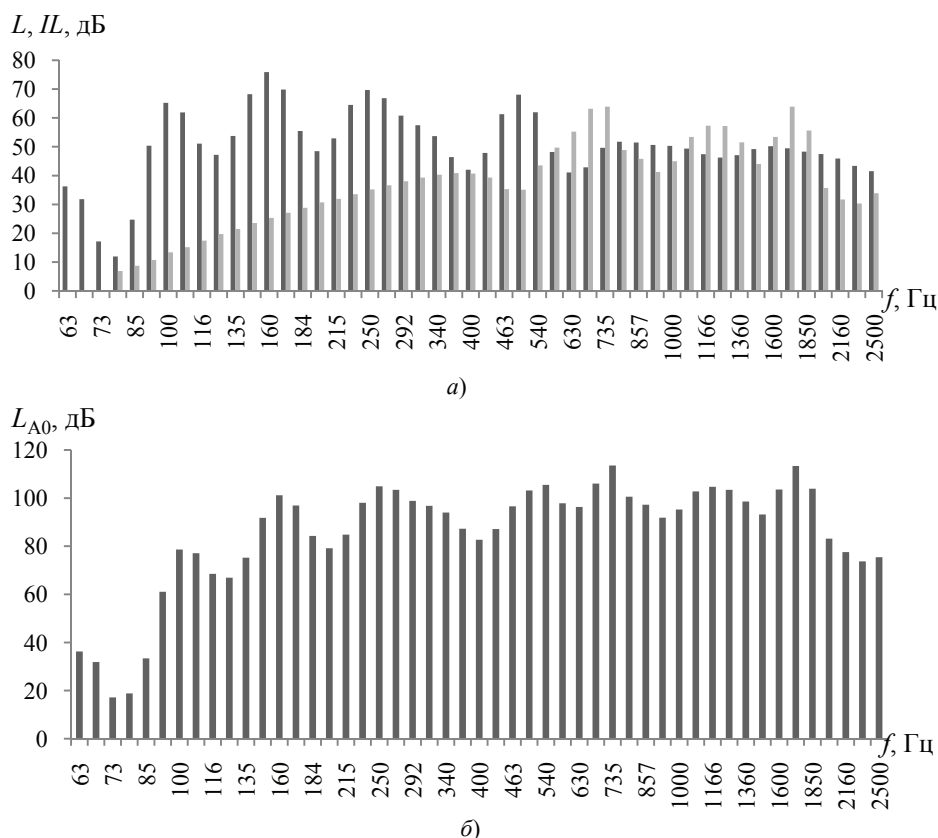


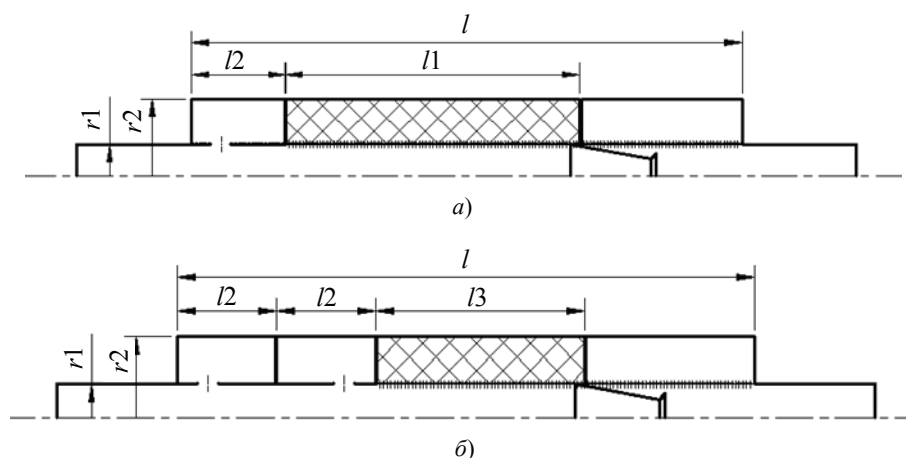
Рис. 3. Спектры заглушенного шума выпуска и вносимые потери серийного глушителя (*a*) и незаглушенного шума выпуска (*б*):

■ – шум выпуска; ■ – вносимые потери

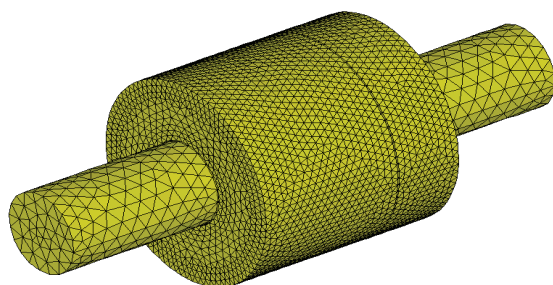
приведенных выше принципов, уменьшение длины секции со звукопоглощающим материалом (диссипативный элемент) приведет к снижению обобщенных потерь в широком диапазоне, но может дать увеличение на низкочастотном. Введение в конструкцию двух резонаторов по аналогии с двумя камерами расширения может дать расширение резонансной частотной полосы.

Для проверки выдвинутых предположений спроектированы два варианта глушителей, с одним и двумя резонаторами Гельмгольца с длинами секций  $l_2 = 165$  мм и отверстиями диаметром 35 мм (рис. 4). Длина диссипативной секции в варианте 1 не изменилась по сравнению с серийным, а в варианте 2 – уменьшилась,  $l_3 = 348$  мм. Для последующего сравнения проектируемых глушителей между собой и с серийным необходимо определить их потери передачи  $TL$  с помощью численного расчета.

Для проведения численного расчета модели глушителей были созданы и разбиты на конечные элементы (рис. 5) в программной среде ANSYS, размер элементов и их количество выбирались из рекомендаций, представленных в [4]. Затем конечно-элементные сетки были импортированы в программный пакет SYSNOISE, в котором заданы граничные условия (колебание поршня с единичной амплитудой на входе и безэховая граница на выходе), проведен акустический расчет и сняты значения давлений в трех точках. Далее по методу трех точек рассчитаны потери передач (рис. 6).



**Рис. 4. Проектируемый глушитель выхлопа:**  
а, б – соответственно варианты 1, 2



**Рис. 5. Конечно-элементная модель глушителя выхлопа – вариант 2**

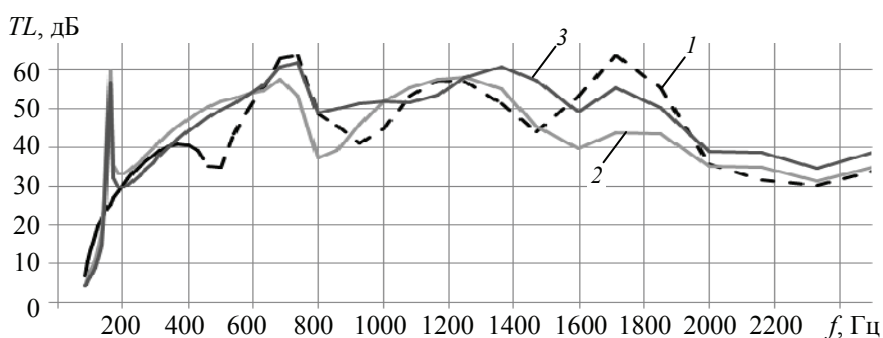


Рис. 6. Графики потерь передачи глушителей шума: серийного 1 и проектируемых 2 (вариант 1), 3 (вариант 2)

Таблица 1

### Сравнение акустической эффективности глушителей по показателям $OTL$ и $OIL$

Интегральный показатель	Глушитель		
	Серийный	Вариант 1	Вариант 2
$OTL$ , дБ	19,2	15,4	14,5
$OIL$ , дБА	39,4	41,7	40,5

На основе полученных потерь передачи  $TL$ , представленных в частотном диапазоне 80 Гц – 2,5 кГц в виде  $N$  дискретных значений, вычислены  $OTL$  [9]

$$OTL = -10 \lg \left( N^{-1} \sum_1^N 10^{-0,1TL_i} \right). \quad (1)$$

При этом спектр звукового давления падающей волны на входе является белым шумом, и никаких преимуществ у предлагаемых конструкций по сравнению с серийной обнаружить не удастся (табл. 1)

Если же спектр звукового давления на входе принять равным спектру незаглушенного шума  $L_{A0}$ , то согласно [9] формула (1) примет вид

$$OIL = L_{A0} - 10 \lg \left( N^{-1} \sum_1^N 10^{0,1(L_{A0i} - IL_i)} \right). \quad (2)$$

Таким образом, переход к использованию  $OIL$  дает возможность сравнить акустическую эффективность различных конфигураций глушителей и выбрать для заданного спектра незаглушенного шума выпуска наилучший вариант (см. табл. 1).

### Заключение

В работе для оптимизации серийного комбинированного глушителя системы выпуска грузового автомобиля применен интегральный показатель акустической эффективности – обобщенные вносимые потери, позво-

ливающий сократить затраты времени на подбор основных пространственных параметров глушителей перед началом численного расчета, руководствуясь выведенными ранее принципами оптимизации.

#### *Список литературы*

1. Соглашение «О принятии единообразных технических предписаний для колесных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях взаимного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний» : правила ЕЭК ООН № 51. Поправки серии 03. – Текст : электронный // Организация Объединенных Наций. – URL : <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2016/R051r3r.pdf> (дата обращения: 22.11.2021).

2. Kirby, R. A Comparison Between Analytic and Numerical Methods for Modelling Automotive Dissipative Silencers with Mean Flow / R. Kirby // *Journal of Sound and Vibration*. – 2009. – Vol. 325, Issue 3. – P. 565 – 582. doi: 10.1016/J.JSV.2009.03.032

3. Barbieri, R. Finite Element Acoustic Simulation Based Shape Optimization of a Muffler / R. Barbieri, N. Barbieri // *Applied Acoustics*. – 2006. – Vol. 67, No. 4. – P. 346 – 357. doi: 10.1016/J.APACOUST.2005.06.007

4. Комкин, А. И. Особенности конечно-элементного моделирования глушителей шума / А. И. Комкин, Л. С. Воробьева // *Известия высш. учеб. заведений. Машиностроение*. – 2012. – № 4. – С. 50 – 58.

5. Topology and Shape Optimization of Dissipative and Hybrid Mufflers / B. Ferrandiza, F. D. Denia, J. Martinez-Casas [et al.] // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2020. – Vol. 62. – P. 269 – 284. doi: 10.1007/S00158-020-02490-X

6. Lee, J. W. Topology Design of Reactive Mufflers for Enhancing Their Acoustic Attenuation Performance and Flow Characteristics Simultaneously / J. W. Lee, G. W. Jang // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2012. – Vol. 91, No. 5. – P. 552 – 570. doi: 10.1002/NME.4329

7. Комкин, А. И. Оптимизация реактивных глушителей шума / А. И. Комкин // *Акустический журнал*. – 2010. – Т. 56, № 3. – С. 373 – 379.

8. Карнаухова, Л. С. Интегральные показатели акустической эффективности диссипативных глушителей шума / Л. С. Карнаухова, А. И. Комкин // *Акустика среды обитания : материалы Первой Всероссийской конф. молодых ученых и специалистов, 13 мая 2016 г., Москва*. – М., 2016. – С. 80 – 87.

9. Комкин, А. И. Оценка акустической эффективности автомобильных глушителей шума / А. И. Комкин, А. А. Агафонова, С. И. Юдин // *Безопасность в техносфере*. – 2012. – Т. 1, № 3. – С. 61 – 65.

#### *References*

1. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2016/R051r3r.pdf> (accessed 22 2021).

2. Kirby R. A Comparison Between Analytic and Numerical Methods for Modelling Automotive Dissipative Silencers with Mean Flow, *Journal of Sound and Vibration*, 2009, vol. 325, issue 3, pp. 565-582, doi: 10.1016/J.JSV.2009.03.032

3. Barbieri R., Barbieri N. Finite Element Acoustic Simulation Based Shape Optimization of a Muffler, *Applied Acoustics*, 2006, vol. 67, no. 4, pp. 346-357, doi: 10.1016/J.APACOUST.2005.06.007

4. Komkin A.I., Vorob'yeva L.S. [Features of finite element modeling of noise mufflers], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2012, no. 4, pp. 50-58. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Ferrandiza B., Denia F.D., Martinez-Casas J., Nadal E., Rodenas J.J. Topology and Shape Optimization of Dissipative and Hybrid Mufflers, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, vol. 62, pp. 269-284, doi: 10.1007/S00158-020-02490-X

6. Lee J.W., Jang G.W. Topology Design of Reactive Mufflers for Enhancing Their Acoustic Attenuation Performance and Flow Characteristics Simultaneously, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2012, vol. 91, no. 5, pp. 552-570, doi: 10.1002/NME.4329

7. Komkin A.I. [Optimization of reactive noise mufflers], *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustic journal], 2010, vol. 56, no. 3, pp. 373-379. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Karnaukhova L.S., Komkin A.I. *Akustika sredey obitaniya* [Habitat acoustics], Proceedings of the First All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists, 13 May, 2016, Moscow, 2016, pp. 80-87. (In Russ.)

9. Komkin A.I., Agafonova A.A., Yudin S.I. [Assessment of the acoustic efficiency of automobile noise mufflers], *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the technosphere], 2012, vol. 1, no. 3, pp. 61-65. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Application of the Integrated Acoustic Efficiency Indicator to Optimize a Combined Silencer for a Vehicle Exhaust System**

**L. S. Karnaukhova, A. I. Komkin**

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

**Keywords:** combined muffler; generalized transmission losses; optimization; numerical modeling, noise.

**Abstract:** A practical solution to the problem of determining the configuration of a combined muffler for exhaust noise of a vehicle with maximum acoustic efficiency for a given volume is presented using an integral indicator of acoustic efficiency. Optimization of the geometric parameters of noise mufflers based on the integral indicator of acoustic efficiency makes it possible to reduce the time spent on the selection of the main spatial parameters and characteristics of the applied sound-absorbing materials before starting numerical calculations.

---

© Л. С. Карнаухова, А. И. Комкин, 2021