

ТРАНСПОРТНЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 629.1.032.1

Бобер А.В., Герасименко В.И., Жадан В.А., Зарянов В.А.

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛУШИТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ВЫПУСКА

Актуальность проблемы. Среди основных проблем современного общества шум является одной из наиболее злободневных проблем. Главными источниками шума являются транспортные средства, а точнее – их энергетические установки, базирующиеся на двигателях внутреннего сгорания. В наши дни экономически развитые страны расходуют на борьбу с шумом транспортных средств более одного процента своего бюджета. Однако шум растет, несмотря на то, что выхлопные системы становятся все эффективнее, а автомобили становятся все тише. Это объясняется повышением энергонасыщенности вновь разрабатываемых машин, ростом скоростей движения и повсеместным распространением моторизированной техники.

Начиная с 70-х гг. прошлого века разработаны нормы шумности для жилых помещений, городов, транспорта. Это усложнило работу и архитекторам, и строителям городской инфраструктуры, и автомобильным разработчикам. Конструкторы наряду с выполнением экологических предписаний обязаны обеспечивать выполнение стандартов шумности.

В настоящее время европейский стандарт ограничивает звук от работающего автомобиля 75 дБ, в ближайшее время эти требования должны еще ужесточиться. Чтобы добиться требуемого уровня шума, в автомобильной промышленности ежегодно внедряется много технических новшеств, реализующих различные принципы шумоподавления. Впрочем, главным и, пожалуй, единственным действенным средством борьбы с шумом выхлопа двигателя по-прежнему является глушитель.

Специалисты ГП «ХКБМ им. А.А. Морозова» также принимают активное участие в решении проблемы шума силовых установок при создании новых образцов легкобронированной техники и по модернизации уже существующих. Одним из основных требований, предъявляемых к этим изделиям, является улучшение параметров подвижности, что требует применения мощных современных двигателей, а это, в свою очередь, ведет к увеличению шумового воздействия.

В проектируемых силовых установках широко используются хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации автомобильные дизельные двигатели иностранного производства. Применение автомобильных двигателей требует использования автомобильных конструктивных решений при проектировании систем, обслуживающих двигатель. Так, например, возникает необходимость в разработке системы выпуска с глушителем в качестве основного средства снижения уровня шума.

Как правило, производитель двигателей дает рекомендации по выбору глушителей. Однако применение таких глушителей не всегда возможно из-за особенностей компоновки проектируемого изделия, поэтому возникает необходимость в самостоятельной разработке глушителей. С целью ускорения проектирования и снижения трудоемкости изготовления, обычно выбираются известные, хорошо зарекомендовавшие себя схемы глушителей. В большинстве случаев это комбинированные резонансно-расширительные глушители, эффективность которых доказана на многочисленных образцах мировой автопромышленности.

© А.В. Бобер, 2017

Цель статьи. Целью настоящей статьи является отражение теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих на стадии проектирования определять конструкцию и параметры глушителя с требуемыми акустическими характеристиками.

Основная часть. Глушитель является важным конструктивным элементом системы выпуска и предназначен для снижения уровня шума отработавших газов за счет преобразование энергии отработавших газов путем снижения их скорости, температуры и пульсации. Глушитель преобразует энергию звуковых колебаний в тепловую энергию, чем достигается снижение уровня шума до определенного значения. Вместе с тем применение глушителя в выпускной системе создает противодействие выпуску, которое приводит к некоторому снижению мощности двигателя.

По принципу действия глушители делят на активные глушители, реактивные и комбинированные.

В активных глушителях звуковая энергия превращается в тепло в звукопоглощающем материале, который размещают на внутренних полостях глушителя, в трубопроводах и вблизи их выходов в атмосферу. Поток газов в таких, т.н. «прямоточных», глушителях обычно направляется вдоль поверхности поглотителя, а их гидравлическое сопротивление в большинстве случаев относительно невелико.

Эффективная работа поглощающих конструкций в широком диапазоне частот обеспечивается при толщинах размещенных на них слоев звукопоглощающего материала порядка $1/4$ длины волны заглушаемого звука. Для снижения уровня шума низкой частоты необходимые размеры поглощающих элементов становятся слишком большими, поэтому более эффективным оказывается применение реактивных глушителей.

Кроме того, к звукопоглощающим материалам, используемым в глушителях, предъявляются следующие требования:

- высокий коэффициент поглощения в нужном диапазоне частот;
- безвредность для человека;
- негорючесть;
- стабильность свойств при воздействии рабочих факторов;
- устойчивость к износу;
- невысокая стоимость и доступность.

Одновременное выполнение всех требований невозможно, требуется разумный компромисс при выборе материала. Поэтому глушители активного типа применяют в системах питания воздухом, а для систем выпуска отработавших газов широко применяют реактивные глушители.

Особенностью реактивных глушителей является резонансный характер их характеристик. При возбуждении реактивного глушителя широкополосным шумом большая часть энергии передается через него вблизи резонансных частот системы за счет возбуждения собственных колебаний газа, соответствующих собственным частотам, близким к частотам входного сигнала.

Существенным достоинством реактивных глушителей является отсутствие в них звукопоглощающих материалов, что особенно важно при использовании их в системах выпуска, где применение этих материалов осложнено их замасливанием и коксованием продуктов сгорания.

Если в спектре излучаемого шума имеются низкие и высокие частоты, то целесообразно применение комбинированных глушителей. Как правило, подобные глуши-

тели шума выполняются в виде системы расширительных и резонансных камер, соединенных между собой с помощью сплошных или перфорированных труб.

В реактивных глушителях используется несколько принципов снижения уровня шума:

- расширение потока отработавших газов;
- изменение направления потока отработавших газов;
- интерференция звуковых волн.

Расширение потока выполнено за счет применения одной или нескольких камер разного объема, разделенных перегородками. Такое решение позволяет эффективно гасить низкочастотные звуковые колебания. Наряду с расширением в глушителе может осуществляться сужение потока с помощью диафрагменного отверстия (дресселя) для гашения высокочастотного шума.

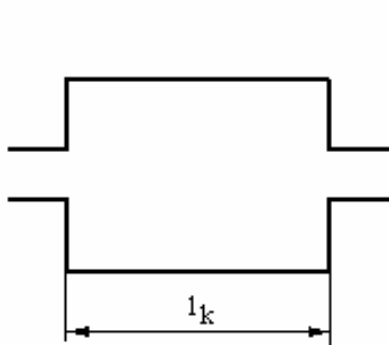


Рис. 1. Камерный глушитель

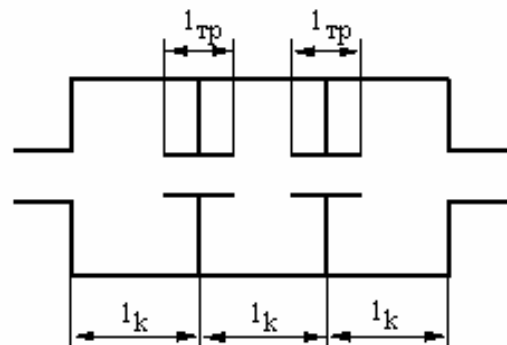


Рис. 2. Многокамерный глушитель

Простейший резонансный глушитель (см. рис. 1) представляет собой одиночную расширительную камеру. Его эффективность можно рассчитать по формуле:

$$\Delta L_k = 10 \ln[1 + 1/4(m - 1/m)^2 \sin^2 kl_k] \quad (1)$$

где $m = S_2/S_1$ – отношение площади поперечного сечения расширительной камеры и соединительной трубы ячейки глушителя, m^2 соответственно; lk – длина расширительной камеры, м; $k = 2\pi f/c$ – волновое число, m^{-1} ; f – частота, Гц; c – скорость звука газов, проходящих через глушитель, м/с.

Частотная характеристика затухания в камерном глушителе имеет ряд чередующихся максимумов, значение которых определяется значениями параметра m , а частота – длиной камеры расширения lk .

Заглушающее действие одиночных расширительных камер эффективно лишь при условии, что основной канал выхлопного тракта имеет поперечные размеры много меньше поперечного размера расширительной камеры.

Если однокамерный глушитель не обеспечивает достаточного снижения шума, используют многокамерные глушители. Эффективность таких глушителей шума растет с увеличением числа камер, которые соединяются друг с другом с помощью отверстий

в разделительных перегородках или с помощью внутренних или наружных соединительных труб.

Если N однокамерных камер длиной lk расположены «в цепочку» и соединены между собой трубками длиной lmp (см. рис. 2), то эффективность многокамерного глушителя определяется по формуле [1]:

$$\Delta L = 20N \lg \{ |y| + \sqrt{y^2 + 1} \}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где

$$y = 0,5 \{ [1 + 0,5(m + 1/m)] \cos[k(l_k + l_{mp})] + [1 - 0,5(m + 1/m)] \cos[k(l_k - l_{mp})] \}$$

$m = S_2/S_1$; S_2 и S_1 – площади поперечного сечения расширительной камеры и соединительной трубы ячейки глушителя, m^2 соответственно; lk и lmp – длина камер и труб, м.

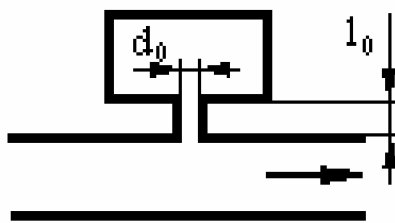


Рис. 3. Резонатор Гельмгольца

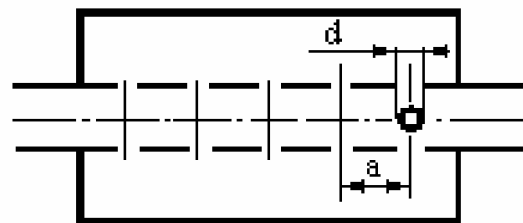


Рис. 4. Концентричный резонатор

Другим распространенным типом реактивных глушителей являются резонансные, частотная характеристика которых имеет ряд узких полос глушения вблизи собственных частот резонатора. Одиночный резонатор Гельмгольца (рис. 3) представляет собой полость, соединенную горловиной с трубопроводом. При возбуждении в резонаторе собственных колебаний звуковая энергия проходящей волны затрачивается на преодоление инерционности массы газа в горловине и упругости газа в полости.

Частота собственных колебаний резонатора Гельмгольца определяется выражением:

$$f_p = c \sqrt{K_0/V} / (2\pi), \text{ ц} \quad (3)$$

где c – скорость звука, м/с; V – объем резонатора, m^3 ; $K_0 = S / (l_0 + \pi d_0/4)$ – проводимость горловины, м; S – площадь сечения горловины, m^2 ; l_0 – длина горловины, м; d_0 – диаметр горловины, м.

Следует иметь в виду, что одиночный резонатор Гельмгольца редко используется для борьбы с шумом. Гораздо чаще используют концентричные резонаторы, которые образованы при помощи камеры, концентрично расположенной по отношению к трубопроводу, в котором выполнен ряд равномерно распределенных отверстий (рис.4).

Величина глушения в однокамерном глушителе может быть определена, используя графики, приведенные на рис. 5, а в одиночном резонаторе – используя рис. 6. Максимальное глушение обеспечивается на частоте, при которой четверть длины волны

равна длине lk , причем максимумы повторяются при нечетных числах четвертей волны ($n \lambda/4$, где $n=1, 3, 5, \dots$).

В большинстве конструкций глушителей, за исключением прямоочных глушителей, предусматривается изменение направления движения потока отработавших газов. Угол поворота потока в подобных глушителях находится в пределах $90-360^\circ$, чем достигается глушение средне- и высокочастотных звуковых колебаний.

Интерференция звуковых волн, в зависимости от характера их наложения, приводит к увеличению или уменьшению амплитуды колебаний. Такой принцип глушения шума реализован путем использования перфорации в трубах и перегородках глушителя.

На эффективность снижения шума влияют геометрические параметры перфорации, такие, например, как относительный шаг расположения отверстий, диаметр отверстий, объем резонансной камеры и др. Изменяя диаметр отверстий, их расположение и количество, объем камеры, окружающей внутреннюю трубу и т.д., можно получить подавление звуковых колебаний в широком диапазоне частот.

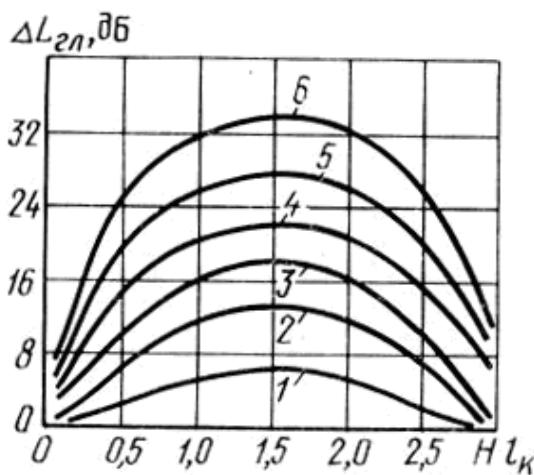


Рис. 5. Графики для расчета глушения камерными глушителями, при m : 1-4; 2-9; 3-16; 4-25; 5-49; 6-1000

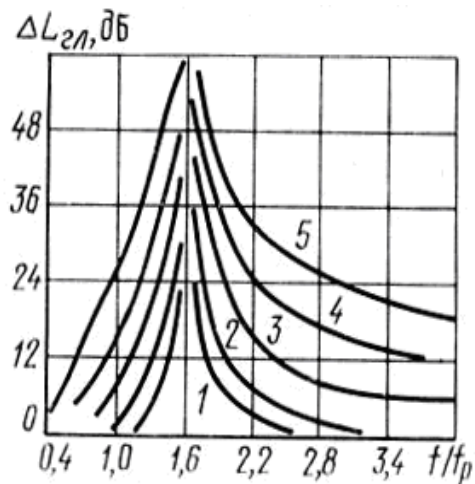


Рис. 6. Графики для расчета глушения одиночными резонаторами, при $\sqrt{kV}/2F$: 1-0,1; 2-1; 3-10; 4-100; 5-1000

Уровень глушения на заданной частоте определяется выражением:

$$\Delta L = 10 \lg \left[1 + \frac{\frac{KV}{4F_0^2}}{\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2} \right], \quad (4)$$

где ΔL – величина заглушения, дБ; K – проводимость отверстий, м; V – объем резонансной камеры, m^3 ; F_0 – площадь поперечного сечения внутренней трубы, m^2 ; f – резонансная частота, Гц; f_0 – частота, на которой определяется заглушение, Гц.

Акустическая проводимость отверстий, в свою очередь, определяется формулой:

$$C_0 = \frac{\frac{\pi}{4}d^2n}{l_c + \frac{\pi d}{4\varphi(\xi)}}, \quad (5)$$

где d – диаметр отверстий, м; n – число отверстий; l_c – толщина стенки внутренней трубы, м; $\varphi(\xi)$ – функция Фока, которая характеризует присоединенную массу воздуха (отработавших газов) в районе отверстия.

Функция Фока определяется по формуле [2]:

$$\varphi(\xi) = \left(1 - 1,41\xi + 0,38\xi^3 + 0,068\xi^5\right)^{-1}, \quad (6)$$

где $\xi = \frac{d}{a}$ – относительный шаг отверстий (см. рис. 7).

На рис. 8 приведен график функции Фока, которым пользуются на практике для упрощения расчетов.

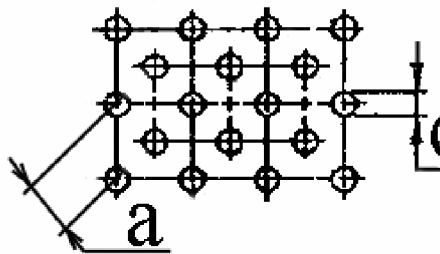


Рис. 7. Схема перфорации трубы

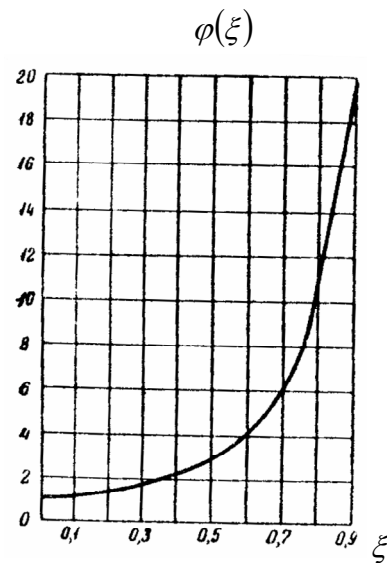


Рис. 8. График функции Фока

Частота настройки резонансного глушителя рассчитывается по формуле

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{273}} \sqrt{\frac{K}{V}}, \quad (7)$$

где c_0 – скорость распространения звука в воздухе или газе при нормальных условиях, м/с; T – температура воздуха или газа, К.

Натурные испытания опытных образцов глушителей, сконструированных с учетом методик, изложенных в [1], [4] и [5], показали:

- где увеличение объема глушителя повышает эффективность шумоподавления;
- увеличение диаметра глушителя предпочтительнее увеличения его длины;
- эффективное глушение достигается применением перфорированных составных частей (труб и перегородок);
- с увеличением площади перфорации и длины пути, проходимого выхлопными газами, эффективность глушителя растет;
- для снижения низкочастотных составляющих шума выхлопа ДВС следует увеличивать объем глушителя;
- для снижения средне- и высокочастотных составляющих шума необходимо увеличивать площадь перфорации в глушителе;
- поворот потока газов перед выходом из глушителя увеличивает его эффективность;
- поворот потока газов в глушителе более 360° нецелесообразен.

Заключение. При разработке системы выпуска, в том числе глушителя – как одного из основных элементов этой системы, проектировщику необходимо учесть и реализовать ряд основных требований, сформулированных в [2],[3], [5] и ряде других источников:

- высокая акустическая эффективность;
- минимальные габариты и масса;
- малое гидравлическое сопротивление;
- конструктивная и технологическая простота; при этом необходимо отметить, что конструкция системы выпуска, так же как и ее составных частей, в значительной мере определяется компоновочными и конструктивными решениями силовой установки и всего изделия;
- долговечность и прочность конструкции;
- герметичность и пожарная безопасность;
- простота обслуживания в процессе эксплуатации;
- невысокая стоимость.

Так, для любого двигателя может быть рассчитан и изготовлен глушитель камерного типа, имеющий необходимую акустическую эффективность и минимальное гидравлическое сопротивление. Однако глушитель такой конструкции имеет большие размеры, что практически исключает возможность его использования на силовой установке объектов БТТ.

Комбинированные глушители имеют приемлемые габаритные размеры и гидравлическое сопротивление. Активно-реактивные глушители со звукопоглощающими материалами для глушения шума системы выпуска применяют редко, так как в них происходит осмоление материала и ухудшается акустическая эффективность. Поэтому в качестве глушителей шума системы выпуска используют камерно-резонансные или камерные с перфорированными активными элементами глушители.

Анализ используемых систем глушения, с учетом области их применения, позволяет сделать вывод, что для снижения шума выхлопа ДВС в настоящее время наибольшее распространение нашли трех- или четырехкамерные реактивно-расширительные и/или комбинированные резонансно-расширительные глушители с изменением направления движения газового потока и применением составных частей с перфорацией. Глушители такого типа успешно используются в системах выпуска отработавших газов на изделиях БТР-4Е, БТР-4В, ТБКМ «Дозор-Б».

Литература. 1. Бердников Л.А. Расчетные исследования влияния геометрических параметров резонансного (перфорированного) глушителя шума на эффективность снижения уровня шума / Л.А. Бердников, Д.А. Шишкин, Г.В. Пачурин // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2-4. – С. 701-703. 2. Борьба с шумом на производстве / Под общ. ред. Е.Я. Юдина.- М.: Машиностроение, 1985.- 400 с. 3. Колесников А.Е. Шум и вибрация / А.Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1988.– 248 с. 4. Техническая акустика транспортных машин / Под ред. Н.И. Иванова.– СПб: Политехника, 1992.– 365 с. 5. Иванов Н.И. Борьба с шумом и вибрациями на путевых и строительных машинах / М.: Транспорт, 1978. – 272 с. 6. Тузлов Л.В. Глушители шума в отечественном и зарубежном дизелестроении / Л.В. Тузов, М.А. Киселев, Л.Г. Егоров, А.В. Кныш, И.М. Чирков // - М.: Машиностроение, 1981, с.27-33.

Bibliography (transliterated): 1. Berdnikov L.A. Raschetnye issledovaniya vliyaniya geometricheskikh parametrov rezonansnogo (perforirovannogo) glushitelya shuma na ehffektivnost' snizheniya urovnya shuma / L.A. Berdnikov, D.A. SHishkin, G.V. Pachurin // *Fundamental'nye issledovaniya*. – 2015. – № 2-4. – S. 701-703. 2. Bor'ba s shumom na proizvodstve / Pod obshch. red. E.YA. YUdina.- M.: Mashino-stroenie, 1985.- 400 s. 3. Kolesnikov A.E. SHum i vibraciya / A.E. Kolesnikov. – L.: Sudostroenie, 1988.– 248 s. 4. Tekhnicheskaya akustika transportnyh mashin / Pod red. N.I. Ivanova.– SPb: Politekhnika, 1992.– 365 s. 5. Ivanov N.I. Bor'ba s shumom i vibrაციyami na putevyh i stroitel'nyh mashinah / M.: Transport, 1978. – 272 s. 6. Tuzlov L.V. Glushiteli shuma v otechestvennom i zarubezhnom dizelestroenii / L.V. Tuzov, M.A. Kiselev, L.G. Egorov, A.V. Knysh, I.M. Chirkov // - M.: Mashinostroenie, 1981, s.27-33.

Бобер А.В., Герасименко В.И., Жадан В.А., Зарянов В.А.

ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ГЛУШНИКІВ ДЛЯ СИСТЕМ ВИПУСКУ

Метою даної статті є відображення теоретичних і експериментальних досліджень, що дозволяють на стадії проектування визначати конструкцію і параметри глушника з необхідними акустичними характеристиками.

Бобер А.В., Герасименко В.И., Жадан В.А., Зарянов В.А.

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛУШИТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ВЫПУСКА

Целью настоящей статьи является отражение теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих на стадии проектирования определять конструкцию и параметры глушителя с требуемыми акустическими характеристиками.

A. Bober, V. Gerasimenko, V. Zhadan, V. Zaryanov

DESIGN BASIS FOR EXHAUST SYSTEM MUFFLERS

The purpose of this article is to represent the theoretical and experimental researches, which make it possible to determine the design and parameters of muffler with required acoustic properties at the design stage.