

Транспортне машинобудування

УДК 629.1.032.1

Бобер А.В., Герасименко В.И., Жадан В.А., Зарянов В.А., Крот С.Г.

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТИПА ГЛУШИТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ВЫПУСКА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Актуальность проблемы. Современные двигатели внутреннего сгорания – основа силовой установки любого транспортного средства, как гражданского, так и военного назначения – являются источниками интенсивного шума, который негативно отражается на здоровье и работоспособности личного состава.

Под влиянием интенсивного шума ухудшается зрение, снижается слух, изменяются ритмы дыхания и сердечной деятельности, повышается внутричерепное и кровяное давление, возникают заболевания желудочно-кишечного тракта и других внутренних органов. Воздействуя на кору головного мозга, шум оказывает негативное влияние на организм человека в целом, ускоряет процесс утомления, ослабляет внимание и замедляет реакции. Специальными исследованиями в войсках было установлено, что более 30% отказов и аварий боевой техники происходит из-за случайных или ошибочных действий личного состава. Кроме того, для военной техники интенсивный шум является серьезным демаскирующим фактором, затрудняющим выполнение боевой задачи.

В то же время рост массы боевых машин, улучшение параметров подвижности и проходимости, повышение их мобильности требует дальнейшего увеличения мощности двигателей, что ведет к повышению уровня шума, излучаемого этими двигателями. При проектировании силовых установок конструкторы, наряду с выполнением ряда основных требований, обязаны также обеспечивать выполнение стандартов шумности.

Так, по состоянию на 2017 год, международные автомобильные стандарты требуют ограничить шум от работающего автомобиля не более 75 дБА; в ближайшее время требования будут пересмотрены в сторону ужесточения. Чтобы добиться требуемого уровня шума, в автомобилях применяются несколько хорошо отработанных схем систем впуска и выпуска, в которых реализуются различные принципы шумоподавления.

В настоящее время специалисты ГП «ХКБМ им. А.А. Морозова» ведут работы по проектированию новых объектов легкобронированной техники и модернизируют уже существующие, принимая тем самым непосредственное участие в решении задач, связанных с проблемами снижения шума военных машин.

Целью настоящей статьи является выработка критериев по выбору типа глушителей шума выхлопа ДВС для военных машин, а также отражение теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих на стадии проектирования определять конструкцию и параметры глушителя с требуемыми акустическими характеристиками.

Основная часть. Для снижения шума силовых установок, попадающего в окружающую среду по газо-воздушному тракту, в качестве основного средства применяются глушители шума. Глушители обычно подразделяются на активные (абсорбционного типа), реактивные и комбинированные.

Выбор типа глушителя зависит от нескольких факторов [1, 2], главными из которых являются:

- спектр шума источника;

© А.В. Бобер, 2019

- величина требуемого снижения шума;
- конструкция заглушаемой установки и условия ее работы;
- допустимое аэродинамическое сопротивление;
- стоимость глушителя.

В активных глушителях звуковая энергия превращается в тепло в звукопоглощающем материале, которым покрыты внутренние полости глушителя, трубопроводы и места вблизи их выходов в атмосферу. Реактивные глушители такого материала не содержат; в них шум снижается за счет отражения звуковой энергии обратно к источнику шума. Как правило, подобные глушители устанавливаются в трубопроводах небольших размеров, когда длина волны заглушаемого шума намного больше диаметра трубопровода [1], [3].

Для глушителей активного типа разработано множество различных конструкций. Наиболее простым из них является трубчатый глушитель, в котором в корпусе 4 расположен канал 1 круглого (рис.1а), квадратного или прямоугольного сечения (рис.1б), выполненный из перфорированного листового материала. Канал облицован звукопоглощающим материалом 2, защищенным слоем перфорированной стеклоткани или фольги, металлической сеткой либо другим аналогичным покрытием для предотвращения его выдувания потоком отработавших газов либо воздуха (для различного рода воздухопроводов).

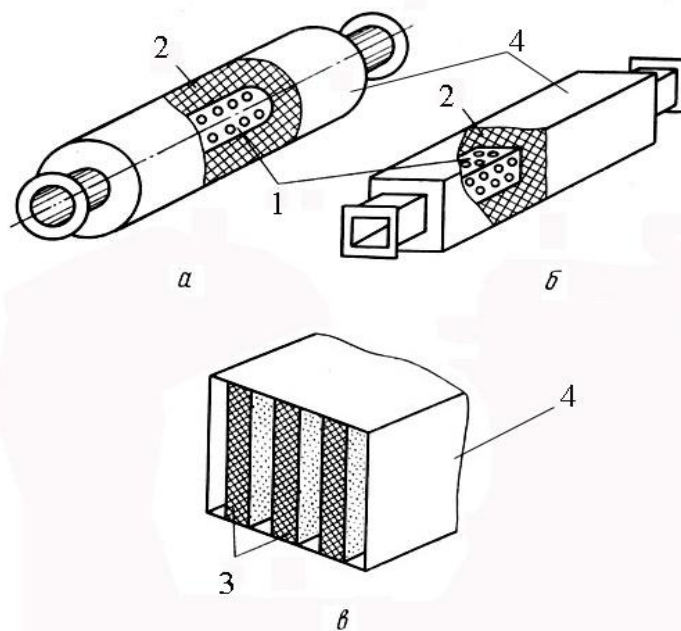


Рисунок 1 – Схема активного глушителя а и б - трубчатого типа, в - пластинчатого типа
1 - канал; 2- звукопоглощающий материал; 3 - щиты; 4 - корпус

Затухание в трубчатом глушителе приближенно может оцениваться по формуле Белова [1]:

$$f(\alpha) = \frac{Pl}{S} \text{ дБ}, \quad (1)$$

где P – периметр проходного сечения, м; l – длина глушителя, м; S – площадь проходного сечения, м²; $f(\alpha)$ – эквивалентный коэффициент поглощения облицовки.

Опытным путем установлено, что эквивалентный коэффициент поглощения облицовки зависит от действительного коэффициента поглощения материала α следующим образом:

Таблица 1 – Зависимость эквивалентного коэффициента поглощения облицовки от действительного коэффициента поглощения материала α

α	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$f(\alpha)$	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,9	1,2	1,6	2,0	4,0

Для трубчатых глушителей с внутренним диаметром $d_{вн}$ выражение (1) принимает вид:

$$\Delta L = 4,4f(\alpha) \frac{l}{d_{вн}}, \quad (2)$$

где величину $\frac{l}{d_{вн}} = K_{зл}$ принято называть калибром глушителя

Выражение (1) получено, исходя из равномерного распределения плотности звуковой энергии по поперечному сечению глушителя. Однако на частотах выше граничной частоты, на которой внутренний поперечный размер глушителя равен половине длины волны, звуковое поле становится уже не равномерным по сечению, особенно при высоком коэффициенте звукопоглощения облицовки. При этом возникает «лучевой эффект» – появляется осевой пучок звуковой энергии, на который облицовка глушителя оказывает сравнительно слабое воздействие, и величина затухания снижается.

Затухание звука не постоянно и по длине глушителя. Наибольшее затухание имеет место на начальном участке глушителя из-за влияния волновых мод высоких номеров. Наибольшее затухание для трубчатых глушителей, осуществляется на первых трех калибрах, а затем затухание уменьшается.

Обобщенная характеристика затухания в трубчатых глушителях длиной три калибра в зависимости от безразмерной частоты - отношения $\frac{f}{f_m}$ - имеет вид, показанный на рисунке 2. Характеристическая частота определяется эмпирической формулой:

$$f_m = \frac{112}{d\sqrt{D}}, \quad (3)$$

где D – гидравлический диаметр проходного сечения глушителя, м; d – толщина звукопоглощающей облицовки, м.

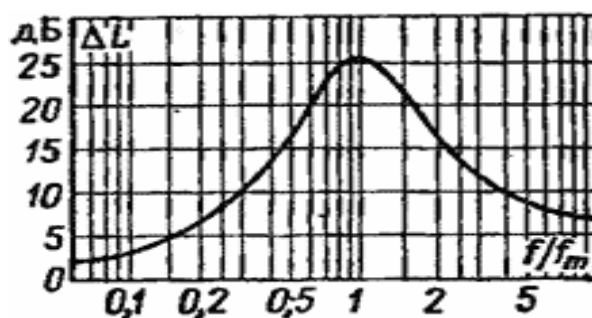


Рисунок 2 – Характеристика затухания шума в трубчатом глушителе

Как видно, кривая имеет подъем от низких частот до характеристической частоты f_m , и плавный спад, который вызывается наличием «лучевого эффекта».

Для практических расчетов [5], [6] в справочниках часто приводятся данные по затуханию шума на 1 м длины активного глушителя. В качестве примера, в таблице 2 приведены экспериментальные данные для трубчатого глушителя, в дБ/м, при толщине звукопоглощающей облицовки $d = 100$ мм и скорости газового потока не более 15 м/с.

В этом случае эффективность всего глушителя определяется по формуле

$$\Delta L_{2л} = \Delta L_1 l + \delta, \quad (4)$$

где ΔL_1 – затухание шума на 1 м длины глушителя, дБ/м; l – длина глушителя, м; δ – поправка, учитывающая более интенсивное затухание шума в начальной части глушителя.

При анализе представленных в таблице 2 данных видно, что использование глушителей трубчатого типа эффективно для глушения звука в трубопроводах относительно небольшого диаметра. Для трубопроводов больших размеров применение трубчатых глушителей нецелесообразно.

Таблица 2 – Затухание шума для трубчатого глушителя

Звукопоглощающая конструкция	Проходной размер глушителя, м	Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Волокно супертонкое стеклянное или базальтовое, $\rho_{ср} = 25$ кг/м ³ , в оболочке из стеклоткани марки Э - 0,1 и перфорированного металлического листа	Ø 0,115	5	8,5	22	26	28	32	32	20
	Ø 0,194	3,5	6,5	20	18	24	25	19	13
	Ø 0,285	2,5	5,5	13	11	14	16	8	3,5
	Ø 0,375	1,5	4,2	12	9,7	13	12,7	6,6	3
	Ø 0,44	1	3,5	10,5	7	10,5	10	2,5	0,5
	0,3x0,3	2,5	6,5	11,5	17	17	13	8	0
	0,5x0,5	1,5	4	7	10	9	6	1	0
	0,8x0,8	1,3	3,5	6	6,5	5	3	0,5	0
	1,0x1,0	1	3	5	1,5	3,5	1	0	0
	1,2x1,2	1	3	4	4	2,5	0,5	0	0
	От 1,6x1,6 до 1,8x1,8	1	2	2,5	2	1	0,5	0	0
	2,0x2,0	0,8	2	2	1	0,5	0	0	0
2,5x2,5	0,6	1,7	1,8	0,8	0	0	0	0	
Полужесткие минераловатные плиты, $\rho_{ср} = 100$ кг/м ³ , в оболочке из стеклоткани марки Э - 0,1 и перфорированного металлического листа	Ø 0,6	2	4	7	9	6	4	3	2
	Ø 0,8	1	3,2	4,5	7,5	4,5	2,5	1,2	0,5
	Ø 1,4	0,5	2	3	3	1,5	0	0	0
	Ø 2,5	0,1	1,5	1,5	1	0	0	0	0

Величина δ определяется по графикам (рис. 3) в зависимости от отношения $\frac{\sqrt{F}}{\lambda}$, где F - площадь поперечного сечения канала в трубчатом глушителе, а в пластинчатом – площадь канала, образованного двумя соседними пластинами, м^2 ; $\lambda = \frac{c}{f}$ – длина звуковой волны, м, (здесь c – скорость звука, м/с, которая зависит от температуры, $c = 20,1\sqrt{T}$, где T – температура воздуха или газовой смеси, К; f – частота звука, Гц).

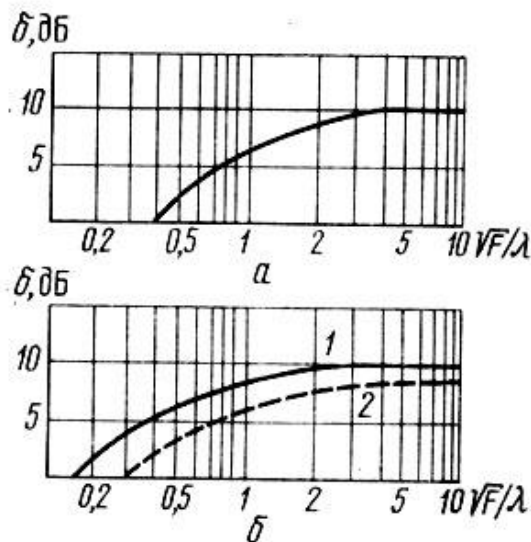


Рисунок 3 – Графики для определения поправки δ для: а – трубчатых глушителей; б – пластинчатых глушителей; 1 – для пластин толщиной 100-200 мм; 2 – 400 - 600 мм

Для увеличения затухания в трубопроводах больших размеров, как правило, применяют равномерное распределение звукопоглощающего материала по проходному сечению. Этот принцип использован в пластинчатом глушителе (рис. 1в).

Пластинчатый глушитель (рис. 4) представляет собой ряд щитов со звукопоглощающим материалом, разделяющих объем трубопровода на ряд параллельных каналов. Боковые стенки щитов выполняются из материала, прозрачного для звуковых волн. Толщина щитов $2d_1$ и расстояние между ними $2d_0$ одинаковы по всему сечению канала. Расстояние между крайними щитами и корпусом глушителя равно d_0 – половине расстояния между другими щитами.

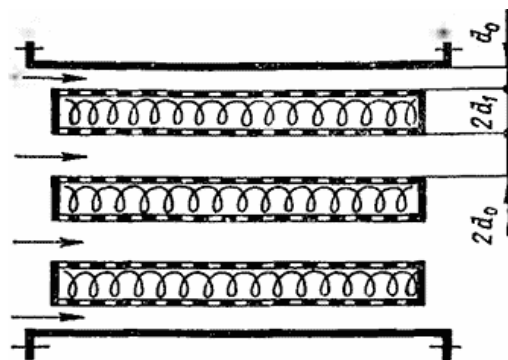


Рисунок 4 – Схема пластинчатого глушителя

Такие геометрические размеры пластинчатого глушителя принимают, исходя из требования обеспечения равенства затухания звука в каждом канале глушителя. При этом формула Белова для оценки затухания звука в пластинчатом глушителе принимает вид:

$$\Delta L = 2,2f(\alpha) \frac{l}{2d_0}, \quad (5)$$

где $f(\alpha)$ – эквивалентный коэффициент поглощения облицовки; $2d_0$ – расстояние между звукопоглощающими щитами, м; l – длина звукопоглощающих щитов, м.

Затухание звука (дБ/м) в пластинчатых глушителях приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Затухание звука (дБ/м) в пластинчатых глушителях

Звукопоглощающая конструкция	Толщина пластины $2d_1$, мм	Расстояние между пластинами $2d_0$, мм	Проходное сечение, %	Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Волокно супертонкое стеклянное или базальтовое, $\rho_{ср} = 25 \text{ кг/м}^3$ в оболочке из стеклоткани Э-0,1 и перфорированного металлического листа	100	50	23	4	10	20	30	36	42	40	30
		100	50	1,7	5,2	11,3	17,6	19,2	21,2	16,3	10,3
	150	75	33	4,4	9,4	14,8	19,4	26,1	25	16,4	8,4
		150	50	1,9	5	10,3	12,2	14	16,4	11	5,4
	200	200	50	2,4	5,6	8,2	10,5	12,5	11	5,6	2,3
		300	67	1,4	3	4,5	6,1	6,8	4	1,8	0,8
	400	160	25	8,5	14	12	17	19	23	16	7,2
		200	33	5,8	9,7	8,8	11,8	14,8	14,7	7,4	4,1
		400	50	4	5,5	4	7	8	6	3	1,5
		800	67	2,3	2,9	2,2	2,3	2,1	1,5	0,7	0,6
Полужесткие минераловатные плиты, $\rho_{ср} = 100 \text{ кг/м}^3$, в оболочке из стеклоткани Э-0,1 и перфорированного металлического листа	100	50	33	2	6	16	30	42	40	30	16
		100	50	1,5	4	10	15	20	17	12	7
	200	100	33	3	7	10	20	28	29	25	8
		200	50	1	4	7,8	12	15	13	6	1,5
	400	400	67	1	2	5	7	7	4	1	0
		200	33	4	8	12	15	15	13	10	2
	600	200	25	6,5	9	14	16	11	7,5	0	0
		300	33	5,5	7	10	10	8	3,5	1	0

Как видно из таблицы 3, при неизменном расстоянии между щитами $2d_0$ при увеличении толщины щита $2d_1$, область максимального затухания смещается в сторону более низких частот. Для эффективного глушения шума в области высоких частот при сохранении постоянного проходного сечения необходимо применять тонкие щиты, расположенные более часто.

Необходимая площадь проходного сечения абсорбционного глушителя $F_{св}$ определяется в зависимости от допустимой скорости $V_{дон}$ газовой смеси в глушителе из соотношения

$$F_{св} \geq \frac{Q_v}{V_{дон}}, \quad (6)$$

где Q_v – объемный расход воздуха или газовой смеси, проходящей через глушитель, $\text{м}^3/\text{с}$; $V_{дон}$ – допустимая скорость газовой смеси, $\text{м}/\text{с}$.

Следует отметить, что обычно значения $V_{дон}$ принимаются в пределах 5-10 $\text{м}/\text{с}$. Для глушителей на впуске компрессорных, газотурбинных установок, испытательных

боксов ТРД $V_{дон}$ – порядка 10-15 м/с. В системах выпуска отработавших газов силовых установок, значения скорости $V_{дон}$ принимаются еще больше – до 20-40 м/с.

В любом случае скорость $V_{дон}$ должна быть такой, чтобы аэродинамическое сопротивление глушителя не оказывало значительного влияния на работу заглушаемой установки. Выбор конструкции глушителя с необходимой эффективностью ΔL_{2n} производится по экспериментальным значениям, приведенным в нормативно-справочной литературе.

Ориентировочная толщина слоя звукопоглощающего материала (при размещении слоя на жесткой стенке) может быть определена по формуле

$$d = \frac{c_n}{bf}, \quad (7)$$

где c_n – скорость распространения звука в звукопоглощающем материале, м/с; b – коэффициент, который учитывает форму канала (принимается $b=4$ при облицовке канала с 4-х сторон и $b=2$ при облицовке канала с 2-х сторон); f – частота заглушаемого звука, Гц.

На практике, толщина звукопоглощающего материала выбирается в пределах 25...40 мм, для большего подавления шума в области низких частот толщина слоя может быть увеличена до 80...100 мм.

В то же время, на эффективность снижения шума влияют геометрические параметры перфорации облицовки или внутренней трубы звукопоглощающего слоя, такие как относительный шаг расположения отверстий, диаметр отверстий, их взаимное расположение и др. Как правило, в глушителях используется шаг перфорации $a = 2d$, где d – диаметр перфорации (обычно диаметр принимается 4...8 мм); при этом коэффициент перфорации равен 0,2. Уменьшение этого значения коэффициента перфорации нежелательно, т.к. приводит к снижению эффективности глушения на высоких частотах.

По результатам расчетов [7] и проведенных натурных испытаний, построены графики зависимостей уровня снижения шума от геометрических параметров перфорации.

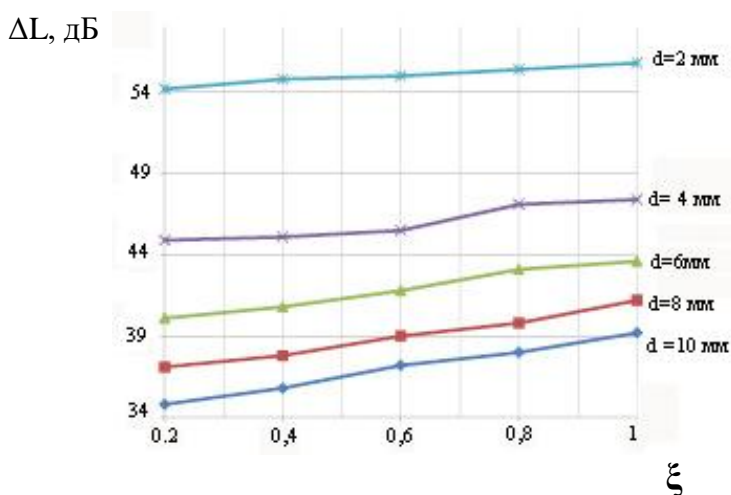


Рисунок 5 – Зависимость уровня снижения шума от геометрических параметров перфорации

На рисунке 5 видно, что по мере уменьшения диаметра отверстий d при фиксированном относительном шаге ξ эффективность глушителя шума повышается. Данный эффект объясняется тем, что на одной площади размещается большее количество отверстий по мере уменьшения их диаметра, а с увеличением числа отверстий возрастает их акустическая проницаемость.

Заключение. Из рассмотренных типов активных глушителей, приведенных в [1], [2] и [4], наиболее подходящими для снижения шума в газо- и воздуховодных трактах силовой установки являются трубчатые активные глушители при относительно небольших размерах газопроводов и пластинчатые активные глушители при больших проходных сечениях. Данные конструкции сочетают акустическую эффективность с приемлемыми аэродинамическими качествами, технологичностью в производстве, достаточной простотой монтажа, а также с относительно невысокой стоимостью.

Однако существует ряд негативных моментов, которые ограничивают применение активных глушителей в системах выпуска, из которых наиболее существенными являются следующие:

- эффективная работа активных глушителей обеспечивается при толщинах слоев звукопоглощающего покрытия порядка $1/4$ длины волны заглушаемого звука;
- забивание поверхности звукопоглощающего покрытия продуктами неполного сгорания топлива (сажа, мазут, различные смолы), содержащимися в отработавших газах, что снижает его акустическую эффективность;
- разрушение звукопоглощающего покрытия пульсирующим потоком отработавших газов и высокой его температурой;
- звукопоглощающее покрытие впитывает и накапливает химически активный (смесь паров воды, кислот и различных солей) конденсат, содержащийся в выхлопных газах, что вызывает интенсивную коррозию корпуса глушителя изнутри. Для увеличения срока службы глушителя проектировщики вынуждены применять нержавеющие стали и использовать устройства принудительного удаления конденсата, что усложняет конструкцию глушителя и приводит к увеличению его стоимости;
- большие геометрические размеры трубопроводов и самого глушителя.

Кроме того, к звукопоглощающим материалам, используемым в абсорбционных глушителях, предъявляются следующие, достаточно противоречивые требования, одновременная реализация которых практически невозможна:

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

Таким образом, с учетом вышеизложенного, можно определенно утверждать, что глушители активного типа широко применяются в вентиляционных, компрессорных, газотурбинных установках, на стендах испытания двигателей, аэродинамических трубах и пр., а также в транспортном машиностроении в системах питания воздухом. Для систем выпуска отработавших газов двигателя транспортных машин более эффективным оказывается применение реактивных и комбинированных глушителей – глушители такого типа успешно используются на изделиях БТР-4Е, БТР-4В, ТБКМ «Дозор-Б» и др.

Литература: 1. Белов С.В., Барбинов Ф.А., Козьяков А.Ф., Павлихин Г.П. Охрана окружающей среды – М. : «Высшая школа», 1983. – 264 с. 2. Борьба с шумом на производстве / Под общ. ред. Е.Я. Юдина. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с. 3. Колесников А.Е. Шум и вибрация. – 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. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М. : Машиностроение, 1975. —559 с. 7. Бердников Л.А., Шишкин Д.А., Пачурин Г.В. Расчетные исследования влияния геометрических параметров резонансного (перфорированного) глушителя шума на эффективность снижения уровня шума // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2-4. – С. 701-703.

Bibliography (transliterated): 1. Belov S.V., Barbinov F.A., Koz'yakov A.F., Pavlihin G.P. *Ohrana okruzhayushchej sredy* – M. : «Vysshaya shkola», 1983. – 264 s. 2. *Bor'ba s shumom na proizvodstve / Pod obshch. red. E.YA. YUdina*. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 400 s. 3. *Kolesnikov A.E. SHum i vibraciya*. – 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 vibracijami na putevyh i stroitel'nyh mashinah*. – M. : Transport, 1978. –272 s. 6. *Idel'chik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. — M. : Mashinostroenie, 1975. —559 s. 7. *Berdnikov L.A., SHishkin D.A., Pachurin G.V. Raschetnye issledovaniya vliyaniya geometricheskikh parametrov rezonansnogo (perforirovannogo) glushitelya shuma na effektivnost' snizheniya urovnya shuma // Fundamental'nye issledovaniya*. – 2015. – № 2-4. – S. 701-703.

Бобер А.В., Герасименко В.И., Жадан В.А., Зарянов В.А., Крот С.Г.

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТИПА ГЛУШИТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ВЫПУСКА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Целью настоящей статьи является выработка критериев по выбору типа глушителей шума выхлопа ДВС для военных машин, а также отражение теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих на стадии проектирования определять конструкцию и параметры глушителя с требуемыми акустическими характеристиками.

Бобер А.В., Герасименко В. И., Жадан В.А., Зарянов В.А., Крот С.Г.

КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ТИПУ ГЛУШНИКІВ ДЛЯ СИСТЕМ ВИПУСКУ НА СТАДІЇ ПРОЄКТУВАННЯ

Метою даної статті є визначення критеріїв по вибору глушників шуму вихлопу ДВЗ для військових машин, а також відображення теоретичних і експериментальних досліджень, що дозволяють на стадії проектування визначати конструкцію і параметри глушника з необхідними акустичними характеристиками.

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

CRITERIA FOR CHOICE OF EXHAUST SYSTEM MUFFLER TYPE AT THE DESIGN STAGE

The purpose of this article is to work out the criteria for choosing the internal combustion engine exhaust noise mufflers for military vehicles as well as 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.