

М. В. Кунаш, Г. И. Белохвостов

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЫТНОГО ГЛУШИТЕЛЯ

Аннотация. В статье рассмотрено влияние шума на операторов тракторов, определены варианты конструкции экспериментального глушителя 800-12005100 с максимальной эффективностью шумоглушения в составе трактора «Беларус-1523». Получены положительные результаты по противодавлению в сравнении с серийным глушителем. Соппротивление выхлопным газам экспериментальных глушителей 800-1205100 находилось в пределах 6,4–9 кПа и соответствует требованиям ТУ РБ 101326441.142-2004 на двигатели Д-260.2S2, что в свою очередь ниже серийного.

Ключевые слова: экспериментальный глушитель, уровень звука на срезе, сопротивление выхлопным газам, поршневой двигатель внутреннего сгорания (ПДВС), экспериментальный образец.

M. V. Kunash, G. I. Belokhvostov

*El “Belarusian State Agrarian Technical University”
Minsk, Republic of Belarus*

EXPERIMENTAL STUDIES OF AN EXPERIMENTAL SILENCER

Abstract. The influence of noise on tractor operators is considered. Design variants of experimental silencer 800-12005100 with maximum efficiency of noise reduction as a part of tractor “BELARUS-1523” are determined. Positive results on back pressure in comparison with the serial silencer have been obtained. The resistance to exhaust gases of the experimental silencers 800-1205100 was within the limits of 6,4–9 kPa and corresponds to the requirements of TU RB 101326441.142-2004 for D-260.2S2 engines, which in its turn is lower than the serial one.

Keywords: experimental muffler, sound level at the cutoff, exhaust gas resistance, reciprocating internal combustion engine (PICE), experimental sample.

Введение

Целью дополнительного анализа теоретических основ и закономерностей возникновения шума поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС), рассмотренных в трудах известных ученых, таких как Н. Н. Андреев, А. И. Белов, Л. И. Инзель, Б. П. Константинов, Б. К. Шапиро, И. И. Ключкин, В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, В. Я. Груданов, А. П. Меркулов, Д. А. Чудаков, Н. Г. Шабуня, М. А. Разумовский, Н. И. Иванов, А. И. Комкин и др., являлось уточнение отдельных позиций в правильном понимании рабочих процессов ПДВС, процессов массо- и теплообмена, в частности газообмена, механических процессов, превращения части тепловой энергии в звуковую, формирования акустического излучения, аэроакустических, диссипативных и вихревых процессов [1].

Машины и механизмы прочно вошли в жизненный уклад каждого, а создаваемый ими шум сопровождает человека не только в рабочее время, но и в моменты отдыха и сна. И хотя в настоящее время имеется множество достижений в разработке способов и средств для его снижения, каждый второй житель Земли находится под воздействием повышенного уровня шума.

Выражение известного ученого микробиолога Л. Пастера «Шум – чума XX века» можно с уверенностью отнести и к нынешнему столетию.

Снижение уровня шума трактора является важным средством улучшения имиджа товарного знака машины и не менее важной задачей для защиты физического и психологического здоровья работников [2].

На сегодняшний день наиболее развитые страны расходуют на борьбу с шумом транспортных средств около 1 % госбюджета. Вместе с тем, учитывая тенденцию к повышению энергонасыщенности разрабатываемых машин, с одной стороны, и необходимость снижения их шума, с другой – следует ожидать, что проблема создания малошумных машин будет становиться всё более острой [3].

Цель данной работы – определение вариантов конструкции с максимальной эффективностью шумоглушения в составе трактора «Беларус-1523» [4].

Основная часть

Анализ аэродинамических источников шумообразования акустического излучения ПДВС показал, что отношения между ними различны по интенсивности и зависят от типа двигателя, его конструктивных особенностей, а также от скоростного и нагрузочного режима работы [1, 5].

Особый интерес представляет прогнозирование характеристик газодинамического шума для выпускных систем без заглушающих устройств, так как полученные при этом данные являются исходными для определения заглушающих характеристик систем выпуска при их разработке. Установлено влияние системы заглушения на экономические, мощностные и экологические показатели транспортного средства, где часто одна проблема решается за счет другой [1, 6].

Необходимо подвергнуть более тщательному анализу зависимость интенсивности шума от элементарного объема турбулентной струи, выраженную формулой:

$$dI = \frac{k_0 \rho_c^2 u_c^8}{\rho_0 c_0^5 r^2 \Phi^5(\theta, M_k)} \left(\frac{\sqrt{u'^2}}{u_c} \right)^4 \left(\frac{u_k}{u_c} \right)^4 \frac{dv}{x},$$

где $r = |\vec{x}|$ – радиус, на котором производится данное исследование; c_0 – скорость звука в среде.

Из этой формулы на основании постоянной Лайтхилла определяется суммарная акустическая мощность элементарного объема:

$$dW = k_2 \Psi(M_k) \frac{\Pi}{D^2} \left(\frac{\sqrt{u'^2}}{u_c} \right)^4 \left(\frac{u_k}{u_c} \right)^4 \frac{dv}{x},$$

где

$$\Pi = \frac{\rho_c^2 u_c^8 D^2}{\rho_0 c_0^5},$$

$$\Psi(M_k) = \frac{1 + M_k^2}{(1 - M_k^2)^4},$$

где u_k – скорость конвекции; $M_k = \frac{u_k}{c_0}$; D – характерный геометрический размер; $\frac{\sqrt{u'^2}}{u_c}$ – интенсивность турбулентности; u' – пульсационная скорость.

Функция $\Psi(M_k)$ характеризует эффект усиления акустического излучения вследствие конвекции источников шума [1].

Максимум акустической мощности генерируется в зоне наибольшей активности турбулентности, где градиент средней скорости максимален [1, 7].

Большая часть акустической энергии излучается на участке от седла клапана до сечения, удаленного на расстояние 10 диаметров горловины клапана. Примерно 65 % суммарной акустической энергии струи излучается на начальном участке, где произвольный объем, одна из геометрических составляющих которого равна диаметру тарелки клапана, излучает 0,10...0,15 от акустической мощности струи [1, 7, 8, 9].

Суммарная акустическая мощность вихревого шума определяется как

$$W = (K_0\Phi^2 + K_1\Phi^6 + K_2\Phi^8)F_{\text{кл}}\rho_B c_B^3(1-\chi),$$

где

$$\chi = \frac{P_B - P_{\text{пр}}}{P_B};$$

$$c = \sqrt{nRT_B};$$

$$n = \frac{c_p}{c_r};$$

$$\Phi = \left\{ \frac{2}{n-1} \left[1 - (1-\chi)^{\frac{n-1}{n}} \right] \right\}^{0,5}.$$

Более тщательное изучение необходимо и для определения уровней звуковой мощности шума выхлопной струи турбореактивного двигателя с необходимыми уточнениями применительно к ПДВС [1].

Общий уровень звуковой мощности $L_{p,\text{общ}}$ в дБ выхлопной струи турбореактивного двигателя определяется по формуле:

$$L_{p,\text{общ}} = 80 \lg V_c + 20 \lg \rho_c + 10 \lg F_c - 44,$$

где V_c – скорость истечения газа из сопла, м/с; ρ_c – плотность струи в выходном сечении сопла, кг/м³; F_c – площадь сопла, м².

Системы впуска и выпуска отработавших газов являются источниками шума аэродинамического происхождения. Для их шумоглушения используются специальные устройства, конструкция которых не затрагивает базовых элементов самого двигателя. Основная задача конструирования этих систем заключается в обеспечении заданных параметров заглушения при минимальных габаритах, массе и стоимости системы. При разработке системы выпуска ее акустическая эффективность задается такой, чтобы уровень излучаемой ею звуковой мощности был на 8–10 дБА ниже уровня звуковой мощности акустического излучения, вызываемого колебаниями наружных поверхностей двигателя [1].

Включение в конструкцию системы выпуска нейтрализаторов способствует улучшению заглушающих свойств системы, так как принципы функционирования нейтрализаторов способствуют снижению шума выпуска.

Определенные успехи в расчетных методах исследования глушителей шума ПДВС как отечественных, так и зарубежных научных школ создают хорошие предпосылки для решения прямой задачи – определения акустических характеристик глушителей шума ПДВС заданной конфигурации и размера, и обратной – определения конфигурации и размеров глушителя с требуемыми характеристиками [1].

Нами проведены исследования на тракторе «Беларус-1523.3» (зав. № Y4R152305P1101184), укомплектованном экспериментальным ГШ 800-1205100 (изготовлен по КД БГАТУ) (рисунки 1, 2, 3). В экспериментальном глушителе применили перфорированную вставку в виде трубы Вентури [2]. Трактор при испытаниях был в полной комплектации с облицовочными панелями двигателя. На рисунке 4 представлены схемы установки.

Данные исследования проводились на основе международных стандартов по уровню шума (ISO 7216 и ISO 5131) с учетом типа выхлопной системы, положения микрофона, частоты вращения двигателя (об/мин) и положения передачи.

Для оценки шумового загрязнения использовалось оборудование, указанное в таблице 1.



Рисунок 1 – Трактор «Беларус-1523.3» с экспериментальным глушителем



Рисунок 2 – Экспериментальный глушитель 800-1205100 в разборе

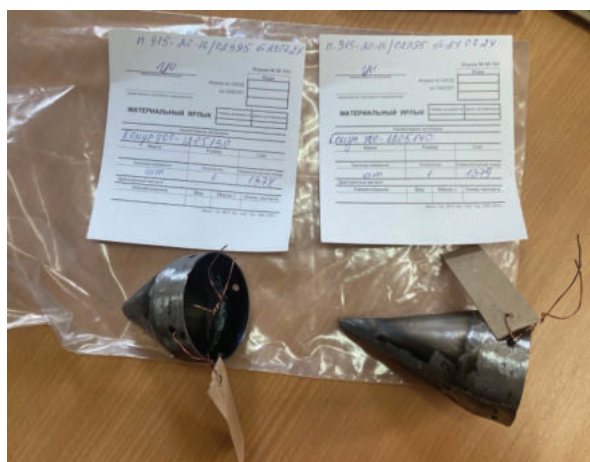


Рисунок 3 – Сменные конусы для глушителя

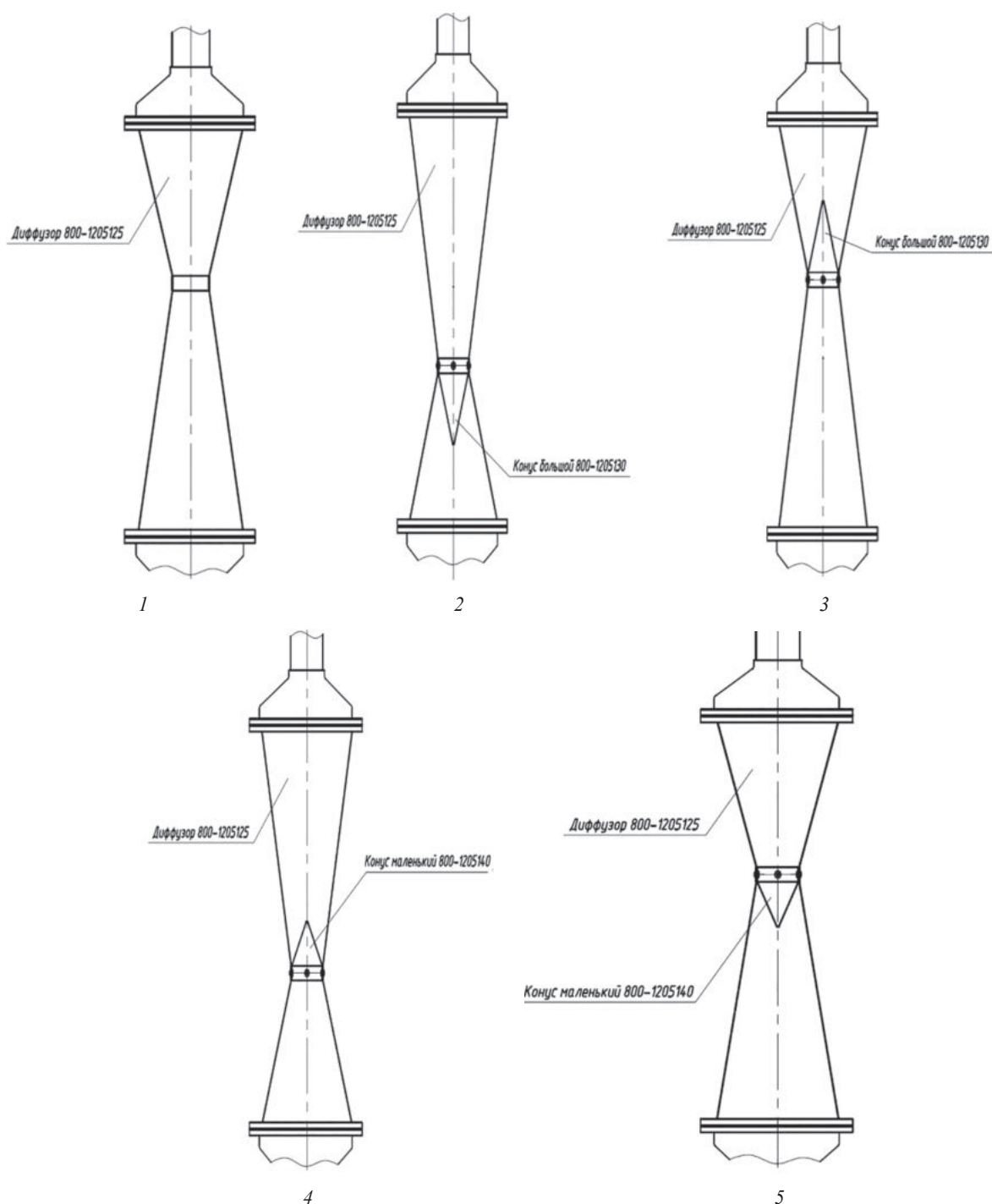


Рисунок 4 – Схемы установки 1, 2, 3, 4, 5

Результаты измерения уровня звука и уровней звукового давления процесса выпуска двигателя у выпускной трубы глушителя (микрофон располагался на расстоянии 0,25 м от края отверстия выпускной трубы глушителя и под углом 60° к оси потока выхлопных газов) приведены в таблице 2.

В первый день исследований была зафиксирована скорость ветра 3 м/с, атмосферное давление 98,8 кПа, температура воздуха 25°C , относительная влажность воздуха 82 %. Во второй день исследований – скорость ветра 2 м/с, атмосферное давление 98,8 кПа, температура воздуха 19°C , относительная влажность воздуха 88 %. Все показатели на момент испытаний полностью соответствовали условиям, заявленным в стандартных регламентах.

Результаты измерения уровня звука и уровней звукового давления процесса выпуска двигателя при установке микрофона у выпускной трубы глушителя на расстоянии 0,25 м от края отверстия выпускной трубы глушителя и под углом 60° к оси потока выхлопных газов приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Испытательное оборудование

Тип средств измерения (испытательного оборудования), зав./инв. №, диапазон и единицы измерения	Точность измерения	Номер свидетельства
Дорога Д002	—	83/1-02
Комбинированный testo 435-4 № 62372751/009 (кан. изм. давления)	0,1 кПа	BY 01 № 0007356-4923
Дат. 06369735 № 20786617/009 (кан. изм. относительной влажности)	± 3,1 % вл.	BY 01 № 0009115-5024
Дат. 06351025 № 10390083/002 (кан. изм. температуры)	± 1°С	BY 01 № 0012944-5524
Зонд 06351025 № (кан. изм. скорости воздушного потока)	(0,3 + 0,02V)	BY 01 № 0007538-4924
Анализатор звука 2260 №2554015 в ком. с капсулом изм. мик. 4189 № 2566160	± 0,7 дБ	BY 01 № 0008064-3423
Калибратор звука CAL200 № 5998	± 0,2 дБ	BY 01 № 0005441-3423-B
Рулетка РИ-10-3-Д № 54123, (0...10000) мм	± 1 мм	BY 01 № 0024546-4123
Манометр МП-160 зав. № 382241 (0-1) МПа.	Класс 1,5	BY 01 № 0002030-4923
Пьезометр	—	—
Устройство для определения КТС	—	№ 1
Отвес	—	—

Таблица 2 – Результаты измерения на срезе глушителя

Наименование глушителя	Уровень звука дБА		Уровень звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									
			31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Серийный глушитель	Холостые обороты двигателя	86,8	—	64	63	67	71	74	76	71	63	—
	Макс. обороты без нагрузки	103,4	—	66	87	86	84	87	87	91	87	68
	Номинальная мощность двигателя	110,5	—	—	64	87	93	96	97	100	93	77
Эксперимен- тальный глу- шитель, 1 схема	Холостые обороты двигателя	91,3	51	64	62	71	73	78	82	74	67	52
	Макс. обороты без нагрузки	110,0	—	95	85	88	90	95	96	96	92	78
	Номинальная мощность двигателя	117,7	—	65	84	93	98	101	102	107	101	85
Эксперимен- тальный глу- шитель, 2 схема	Холостые обороты двигателя	92,4	—	65	64	74	75	78	82	76	67	52
	Макс. обороты ДВС	109,7	—	66	88	90	91	95	96	97	92	76
	Номинальная мощность двигателя	117	—	65	85	94	98	99	100	106	97	82
Эксперимен- тальный глу- шитель, 3 схема	Холостые обороты двигателя	91,1	—	66	60	70	72	79	82	77	66	—
	Макс. обороты ДВС	108,7	—	67	87	88	90	95	95	97	90	71
	Номинальная мощность двигателя	116,1	—	67	87	94	98	100	100	104	94	76
Эксперимен- тальный глу- шитель, 4 схема	Холостые обороты двигателя	90,6	—	64	62	70	72	77	81	74	65	—
	Макс. обороты ДВС	108,1	—	63	86	88	90	94	93	95	90	71
	Номинальная мощность двигателя	115,5	—	64	84	93	97	100	98	105	97	78
Эксперимен- тальный глу- шитель, 5 схема	Холостые обороты двигателя	91,6	51	64	63	73	74	79	82	75	68	53
	Макс. обороты ДВС	109,8	—	61	82	87	90	95	95	96	93	76
	Номинальная мощность двигателя	116,7	—	65	85	90	91	93	91	96	90	73

На рисунках 5–7 представлены графики сравнения уровней звукового давления на срезе глушителя.

После проведения замеров уровней звука и уровней звукового давления были отобраны наилучшие варианты для проведения замеров шумовых характеристик трактора в соответствии с требованиями ТРТС 031/2012.

Результаты измерения уровня звука внешнего шума трактора произведены в соответствии с ТРТС 031/2012.

Результаты измерений уровня внешнего шума движущегося трактора с серийным глушителем представлены в таблице 3.

Результаты измерений уровня внешнего шума неподвижного трактора, дБА: левая сторона – 83,6; правая сторона – 83,1. Результаты измерений уровня внешнего шума движущегося трактора с экспериментальным глушителем, схема 1 представлены в таблице 4.

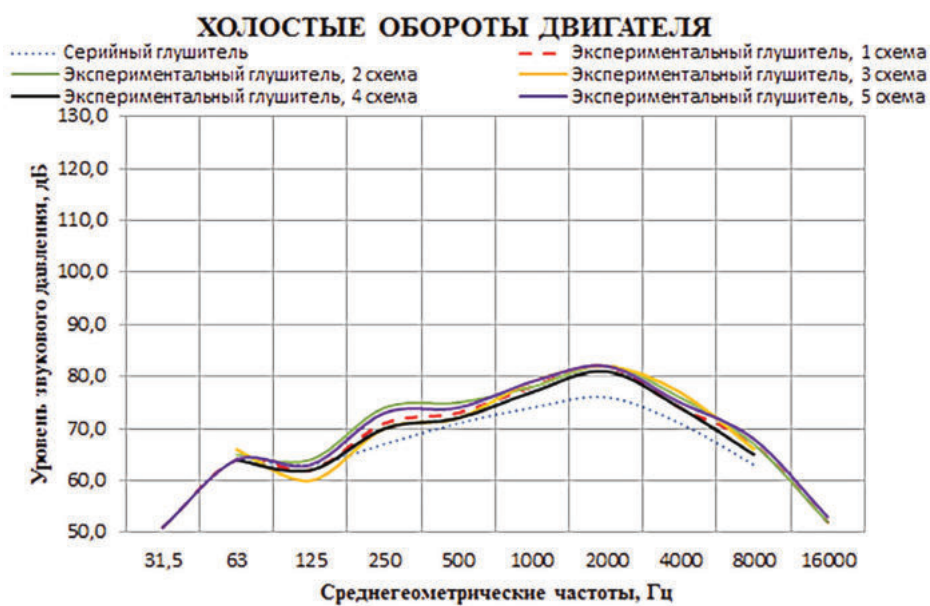


Рисунок 5 – Уровень звукового давления на срезе глушителей на режиме холостых оборотов двигателя

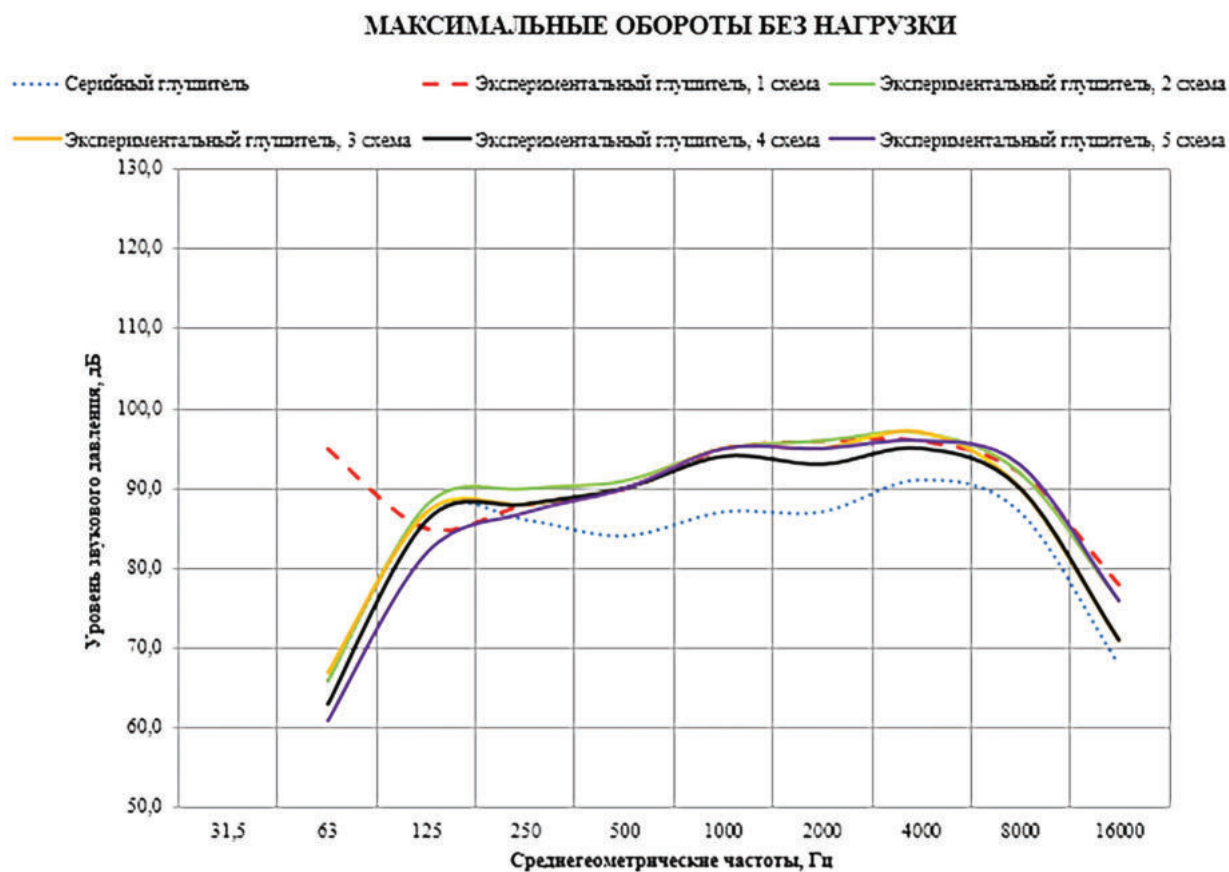


Рисунок 6 – Уровень звукового давления на срезе глушителей на режиме максимальных оборотов двигателя

Номинальная мощность

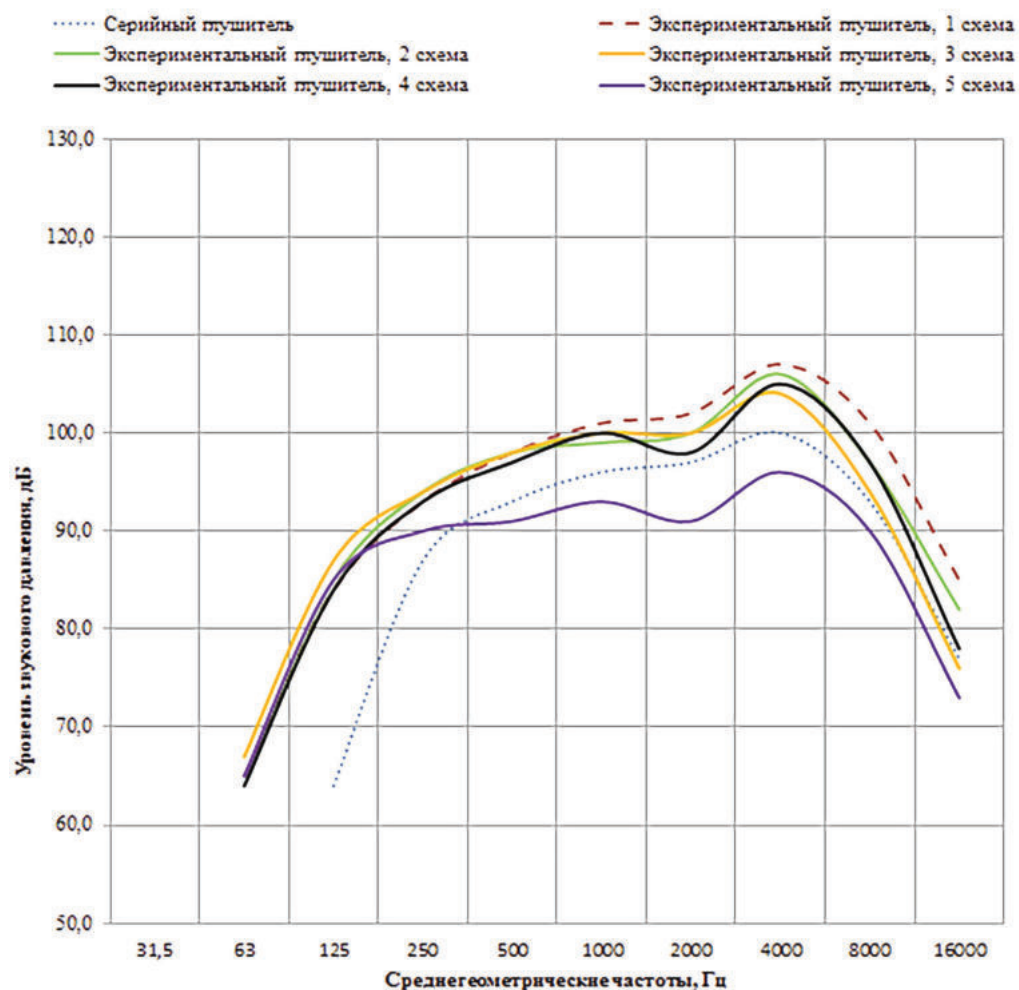


Рисунок 7 – Уровень звукового давления на срезе глушителей на номинальной частоте

Таблица 3 – Результаты измерений уровня внешнего шума движущегося трактора с серийным глушителем

Повторность измерений	Уровень звука внешнего шума, дБА		
	Левая сторона	Правая сторона	Нормированное значение по ГОСТ 33678-2015
1	85,7	86,7	Не более 89,0
2	86,0	86,7	
3	86,3	86,8	
Оценочное значение	86,3	86,8	

Таблица 4 – Результаты измерений уровня внешнего шума движущегося трактора с экспериментальным глушителем, схема 1

Повторность измерений	Уровень звука внешнего шума, дБА		
	Левая сторона	Правая сторона	Нормированное значение по ГОСТ 33678-2015
1	87,5	88,7	Не более 89,0
2	87,8	88,8	
3	87,7	89,0	
Оценочное значение	87,8	89,0	

Результаты измерений уровня внешнего шума неподвижного трактора, дБА: левая сторона – 83,0; правая сторона – 83,5. Результаты измерений уровня внешнего шума движущегося трактора с экспериментальным глушителем, схема 2 представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты измерений уровня внешнего шума движущегося трактора с экспериментальным глушителем, схема 2

Повторность измерений	Уровень звука внешнего шума, дБА		
	Левая сторона	Правая сторона	Нормированное значение по ГОСТ 33678-2015
1	87,9	89,1	Не более 89,0
2	87,8	88,9	
3	87,7	88,9	
Оценочное значение	87,9	89,1	

Результаты измерений уровня внешнего шума неподвижного трактора, дБА: левая сторона – 83,6; правая сторона – 84,3. Результаты измерений уровня внешнего шума движущегося трактора с экспериментальным глушителем, схема 4 представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты измерений уровня внешнего шума движущегося трактора с экспериментальным глушителем, схема 4

Повторность измерений	Уровень звука внешнего шума, дБА		
	Левая сторона	Правая сторона	Нормированное значение по ГОСТ 33678-2015
1	88,0	88,5	Не более 89,0
2	87,9	88,5	
3	87,9	88,5	
Оценочное значение	88,0	88,5	

Результаты измерений уровня внешнего шума неподвижного трактора, дБА: левая сторона – 84,0; правая сторона – 84,0. Уровень звука, дБА: до испытаний – 49,9; после испытаний – 52.

Далее были проведены измерения уровня звука на рабочем месте оператора в соответствии с ТРТС 031/2012. Результаты измерений с серийным глушителем – в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты измерений с серийным глушителем

Передача	Нагрузка на крюке, кН	Скорость движения, км/ч	Уровень шума, дБ (А)		Нормируемое значение, дБ (А)
			Окна и люк открыты	Окна и люк закрыты	
2 д. 2 пер.	Без нагрузки	7,5	85,8	80,6	86,0
			85,7	80,3	
			85,8	80,4	
			ср. знач. 85,8	ср. знач. 80,4	

Результаты измерений с экспериментальным глушителем, схема 1 – представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты измерений с экспериментальным глушителем, схема 1

Передача	Нагрузка на крюке, кН	Скорость движения, км/ч	Уровень шума, дБ (А)		Нормируемое значение, дБ (А)
			Окна и люк открыты	Окна и люк закрыты	
2 д. 2 пер.	Без нагрузки	7,5	85,4	80,6	86,0
			85,4	80,6	
			85,4	80,6	
			ср. знач. 85,4	ср. знач. 80,6	

Результаты измерений с экспериментальным глушителем, схема 2 – в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты измерений с экспериментальным глушителем, схема 2

Передача	Нагрузка на крюке, кН	Скорость движения, км/ч	Уровень шума, дБ (А)		Нормируемое значение, дБ (А)
			Окна и люк открыты	Окна и люк закрыты	
2 д. 2 пер.	Без нагрузки	7,5	85,3	81,7	86,0
			85,3	81,7	
			85,3	81,7	
			ср. знач. 85,3	ср. знач. 81,7	

Результаты измерений противодействия глушителя представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты измерений противодействия глушителя

Наименование глушителя	Противодавление, кПа		
	Холостые обороты ДВС	Макс. обороты ДВС, без нагрузки	Номинальная мощность ДВС
Глушитель серийный	0,5	4,4	14,1
Экспериментальный глушитель, схема 1	0,3	1,9	6,4
Экспериментальный глушитель, схема 2	0,3	2,5	9,0
Экспериментальный глушитель, схема 3	0,3	1,4	9,0
Экспериментальный глушитель, схема 4	0,3	2,4	8,7
Экспериментальный глушитель, схема 5	0,4	2,7	8,8

Уровень звука помех, дБА: до испытаний – 49,9; после испытаний – 52,4.

По итогам проведенных испытаний:

- уровень звука на срезе у экспериментальных глушителей 800-1205100, на режиме номинальной мощности двигателя выше на 5–7,2 дБА, чем у серийного глушителя 110,5 дБА;
- сопротивление выхлопным газам на режиме номинальной мощности серийного глушителя составило 14,1 кПа, что не соответствует требованиям ТУ РБ 101326441.142-2004 на двигатели Д-260.2S2;
- сопротивление выхлопным газам экспериментальных глушителей 800-1205100 находилось в пределах 6,4–9 кПа и соответствует требованиям ТУ РБ 101326441.142-2004 на двигатели Д-260.2S2, что в свою очередь ниже серийного;
- уровень внешнего шума движущегося трактора с серийным глушителем и экспериментальным глушителем 800-1205100 (схема 4) соответствует ТРТС031/2012. У остальных экспериментальных глушителей 800-1205100 наблюдается превышение внешнего шума движущегося трактора с правой стороны;
- уровень звука на рабочем месте оператора с серийным и экспериментальным глушителями 800-1205100 соответствуют ТРТС 031/2012.

Заключение

Предложена конструкция глушителя с улучшенными характеристиками. Определен вариант конструкции с максимальной эффективностью шумоглушения в составе трактора «Беларус-1523».

Сопротивление выхлопным газам на режиме номинальной мощности серийного глушителя составило 14,1 кПа и не соответствует требованиям ТУ РБ 101326441.142-2004 на двигатели Д-260.2S2.

Сопротивление выхлопным газам экспериментальных глушителей 800-1205100 находилось в пределах 6,4–9 кПа и соответствует требованиям ТУ РБ 101326441.142-2004 на двигатели Д-260.2S2, что, в свою очередь, ниже серийного.

Список использованных источников

1. Научные подходы решения задач расчета глушителей шума поршневых ДВС / М. В. Кунаш, Г. И. Белохвостов, А. А. Тиунчик [и др.] // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 окт. 2024 г. : в 2 ч. ; редкол.: Н. Н. Романюк [и др.]. – Минск : БГАТУ. – Ч. 1. – 2024. – С. 195–197.
2. Кунаш, М. В. Перспективная модель глушителя шума трактора / М. В. Кунаш, Г. И. Белохвостов, А. И. Мельнов // Актуальные проблемы и перспективы развития сельских территорий и кадрового обеспечения агропромышленного комплекса : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., 7–8 июня 2023 г. – Минск : БГАТУ, 2023.

3. Комкин, А. И. Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей шума с требуемыми характеристиками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.06 / Комкин Александр Иванович ; Балт. гос. техн. ун-т «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. – СПб., 2012. – 48 с.
4. Кунаш, М. В. Совершенствование глушителя шума тракторов «БЕЛАРУС» / М. В. Кунаш, Г. И. Белохвостов, Н. И. Зезетко // Агропанорама. – 2024. – № 1 (161). – С. 12–16.
5. Глушители шума поршневых двигателей внутреннего сгорания: классификация, основные требования, инновационные конструкции / Г. И. Белохвостов, М. В. Бренч, М. В. Кунаш [и др.] // Производство и переработка сельскохозяйственной продукции : сб. науч. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф., 23–25 ноября 2022 г. ; редкол.: Н. М. Дерканосова [и др.]. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 56–64.
6. Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 28–42.
7. Новые направления в конструировании глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания / В. Я. Груданов, Л. Т. Ткачева, Г. И. Белохвостов, М. В. Кунаш // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. – 2022. – № 2 (12). – С. 74–84.
8. Современные подходы к разработке глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания / Г. И. Белохвостов, М. В. Бренч, М. В. Кунаш [и др.] // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. ; редкол.: В. В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2023. – Вып. 8. – С. 40–45.
9. Груданов, В. Я. Научно-практические подходы к совершенствованию конструкций глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 4. – С. 434–444.