

УДК 534.64

Исследование влияния загрязнения пористых элементов на пропускную способность глушителей шума пневмосистем высокого давления

Иголкин Александр Алексеевич^()*

igolkin.aa@ssau.ru

Пантюшин Алексей Олегович

pantyushin.ao@ssau.ru

Гареев Адель Альбертович

gareev.aa@ssau.ru

Самарский университет, Самара, Россия

Аннотация. Представлена методика оценки пропускной способности глушителей, основанная на анализе относительного времени падения давления в системе. Проведены сравнительные испытания пяти образцов глушителей по критериям акустической эффективности и пропускной способности. Показано, что относительное время падения давления является наиболее информативным индикатором состояния пористого материала, в то время как характер изменения противодавления не показателен для диагностики. Разработан аппаратно-программный комплекс с диагностической программой на языке Python, позволяющий в реальном времени отслеживать загрязнение или разрушение глушителя. Сделаны выводы, что внедрение системы автоматизированного контроля минимизирует риски аварийных ситуаций и снижения производительности.

Ключевые слова: пневмосистемы высокого давления, глушители, шум, противодавление, превентивный контроль

Investigation of the effect of contamination of porous elements on the throughput of mufflers of high-pressure pneumatic systems

Igolkin Alexander Alekseevich^()*

igolkin.aa@ssau.ru

Pantyushin Alexey Olegovich

pantyushin.ao@ssau.ru

Gareev Adel Albertovich

gareev.aa@ssau.ru

Samara University, Samara, Russia

Abstract. A method for estimating the throughput of mufflers is presented, based on an analysis of the relative pressure drop time in the system. Comparative tests of five samples of mufflers according to the criteria of acoustic efficiency and throughput were carried out. It is shown that the relative pressure drop time is the most sensitive indicator of the state of a porous material, while the nature of the back pressure change is not informative for diagnosis. A hardware and software package with a diagnostic program in Python has been developed that allows real-time monitoring of contamination or destruction of the silencer. It is concluded that the introduction of an automated control system minimizes the risks of accidents and reduced productivity.

Keywords: high-pressure pneumatic systems, mufflers, noise, back pressure, preventive control

Введение. Эксплуатация пневматических систем сопровождается повышенным уровнем шума, требующим применения пневматических глушителей для защиты персонала и окружающей среды [1]. Традиционные критерии оценки эффективности глушителей, такие как акустическая эффективность и пропускная способность, недостаточно изучены для систем высокого давления. Существующие нормативные документы, такие как ГОСТ 25144–82 [2], регламентируют оценку пропускной способности для систем низкого давления, что создает методический пробел для систем высокого давления. В связи с этим, актуальной задачей является разработка метода, позволяющего комплексно оценивать работоспособность и безопасность глушителей в условиях высокого давления. Цель работы — разработка аппаратно-программного комплекса для диагностики состояния глушителей шума в пневматических системах высокого давления на основе анализа динамических процессов.

Методы и материалы. В рамках исследования были изучены характеристики пяти образцов пневматических глушителей шума, имеющих разную геометрию и представленных на рис. 1, а также проведено сравнение их работы с системой без глушителя [3].



Рис. 1. Исследуемые глушители

Экспериментальные измерения проводились на специально разработанном стенде (рис. 2), предназначенном для изучения динамических процессов в пневматических системах высокого давления.

В ходе экспериментов для каждого глушителя и для системы без глушителя регистрировались следующие параметры:

1. Акустическая эффективность — оценивалась путем измерения уровня шума при сбросе воздуха. Регистрировались пиковый скорректированный по С уровень звука (Peak C) и максимальный уровень звука А с временной коррекцией I (Imp max). Акустическая эффективность определялась как разница между уровнем шума без глушителя и с установленным глушителем [4].

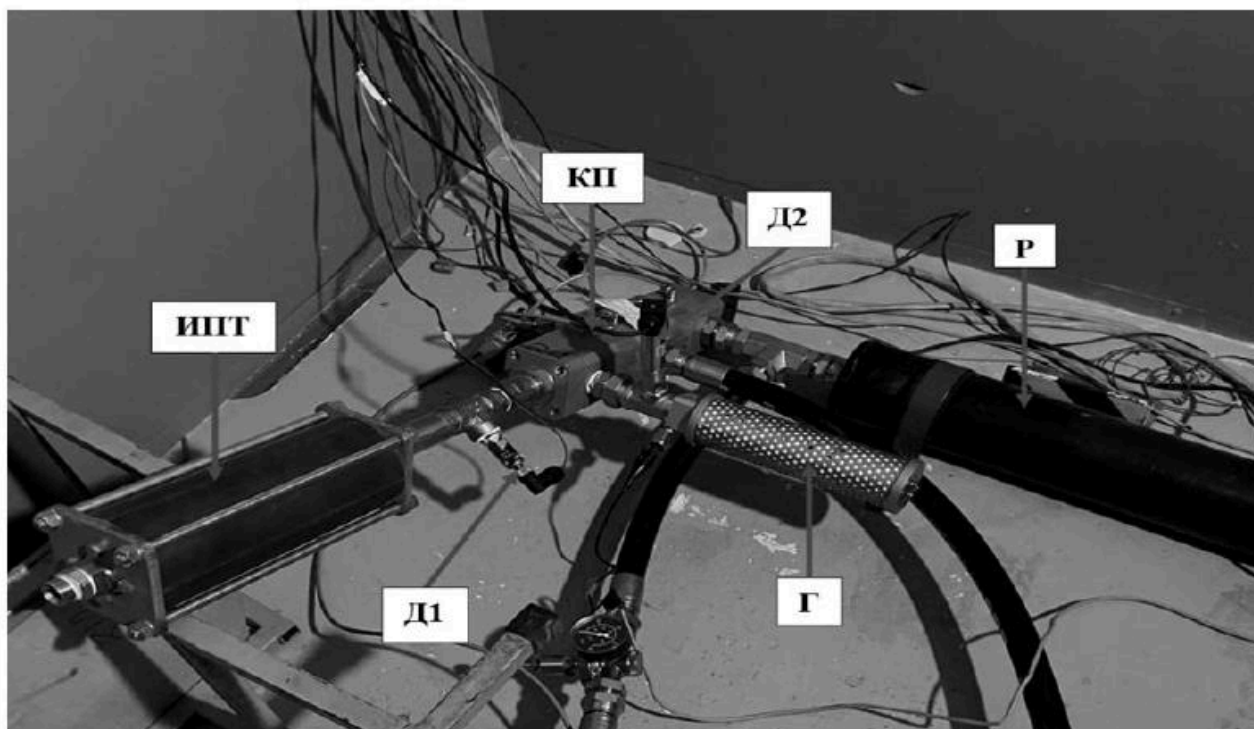


Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда:

Г — глушитель; Р — ресивер; КП — клапан подачи; ИПТ — имитатор ПЭТ тары; Д1 — датчик, показывающий давление в имитаторе ПЭТ тары; Д2 — датчик, показывающий давление перед глушителем (противодавление)

2. Пропускная способность — измерялось противодавление, создаваемое глушителем перед ним, для оценки его влияния на производительность системы и общее сопротивление потоку воздуха [5]. Дополнительно пропускная способность оценивалась по времени падения давления t в пневмоемкости в соответствии с адаптированной методикой, разработанной с учетом положений ГОСТ 25144–82 [2]. Поскольку ГОСТ 25144–82 регламентирует оценку пропускной способности пневмоглушителей для систем низкого давления (до 6,3 Бар, с измерениями падения давления от 5 до 2 бар), для условий высокого давления была применена относительная шкала. Время падения давления t в пневмоемкости измерялось в диапазоне от 80 до 30 % от максимального давления в системе $P_{\max}$, что позволило унифицировать методику для различных начальных давлений. На основе этих измерений рассчитывался коэффициент эффективности k , определяемый как отношение времени падения давления с установленным глушителем t к времени падения давления без глушителя t_1 . Глушитель считался соответствующим требованиям, если значение k не превышало 1,4.

Результаты. В ходе проведенных экспериментальных исследований были получены данные об акустической эффективности и о пропускной способности, позволяющие оценить эффективность различных типов глушителей шума в пневматических системах высокого давления и разработать критерии их эффективности, что является ключевым для диагностики их состояния в условиях, требующих высокого быстродействия.

Результаты оценки акустической эффективности приведены в Таблице 1. Без глушителя система демонстрировала высокий уровень шума: пиковый уровень ($Peak\ C$) составлял 151,0 дБ(С), а импульсный уровень ($Imp\ max$) — 141,1 дБ. Данные значения служили опорными для оценки эффективности шумоподавления. Все исследованные глушители продемонстрировали значительное снижение шума по обоим показателям, но наилучшие показатели акустической эффективности были достигнуты глушителем № 5 [3].

Таблица 1

Данные акустических замеров

№	Глушитель	Peak C, дБС	Imp max, дБА	$\Delta Peak\ C$, дБС	$\Delta Imp\ max$, дБА
1	Без глушителя	151,0	141,1	—	—
2	Глушитель 1	129,6	114,7	21,4	26,4
3	Глушитель 2	124,8	106,7	26,2	34,4
4	Глушитель 3	124,4	105,2	26,6	35,9
5	Глушитель 4	123,6	105,2	27,4	35,9
6	Глушитель 5	122,6	100,1	28,4	41

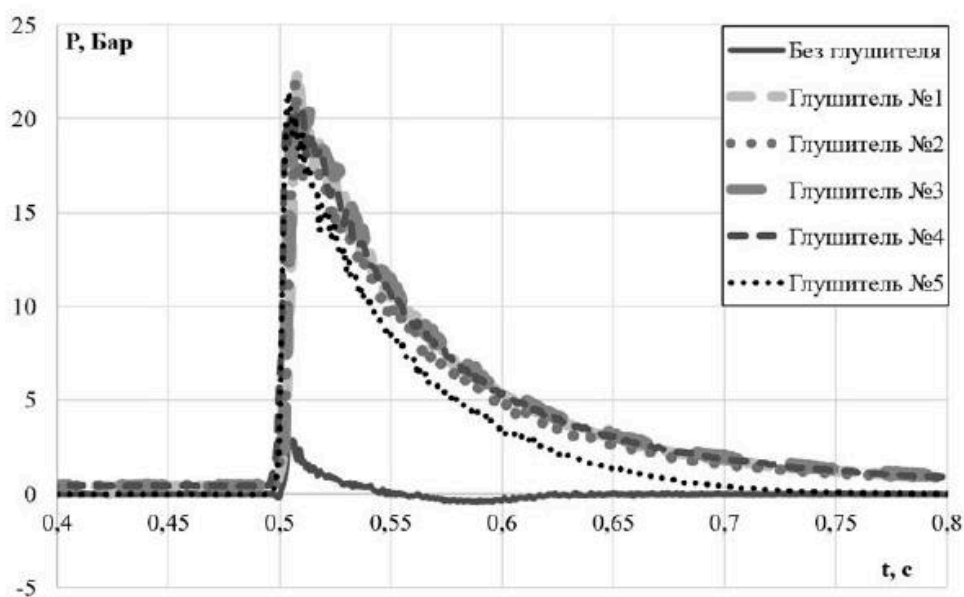


Рис. 3. Противодействие, создаваемое глушителем

Анализ пропускной способности проводился на основе измерений падения давления в системе. Результаты измерений противодействия, создаваемого глушителями, наглядно представлены на рис. 3. Установка глушителя приводит к значительному увеличению противодействия (пиковые значения от 20 до 23 бар) по сравнению с системой без глушителя (пиковое значение около 3 бар). Однако в ходе анализа было установлено, что характер падения

давления в основных точках измерения оказался схожим для различных глушителей. Это ограничило информативность противодействия для диагностики состояния глушителя, поскольку оно не позволяло визуально определять разницу при изменениях в его работе.

В связи с ограниченной информативностью прямого противодействия для характеристики пропускной способности был проанализирован процесс падения давления в имитаторе ПЭТ тары, представленный на рис. 4. На основе этих данных был рассчитан коэффициент эффективности k , определяемый как отношение времени падения давления с глушителем t к времени падения давления без глушителя t_1 в заданном диапазоне (от 23,8 до 9,5 бар), который оказался более чувствительным к изменениям в состоянии глушителя и его пропускной способности.

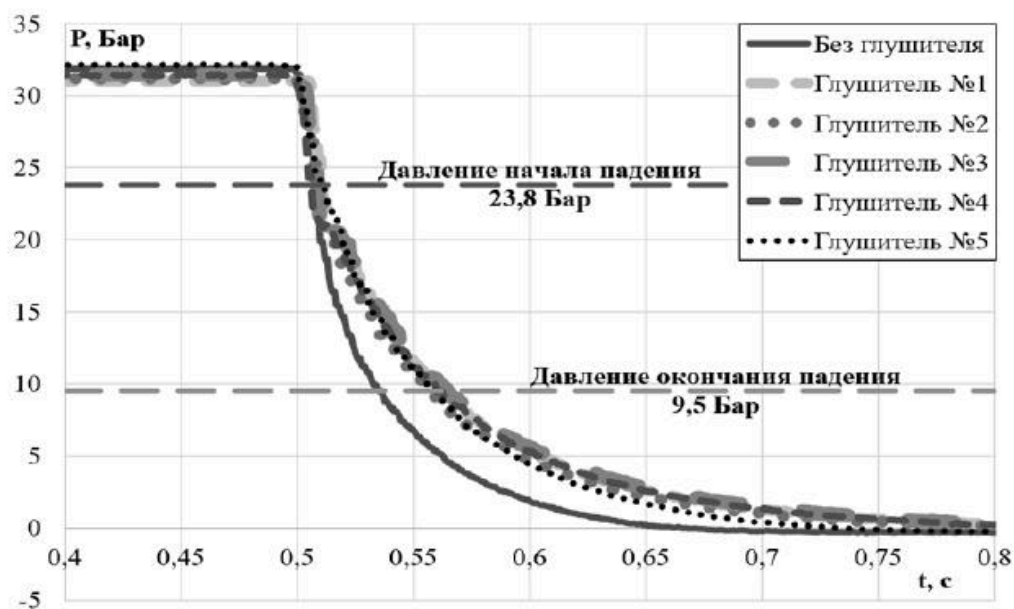


Рис. 4. Падение давления в имитаторе ПЭТ

Расчеты коэффициента эффективности k , представленные в табл. 2, показали значительный разброс значений: глушитель № 1 продемонстрировал наименьшее сопротивление потоку $k = 1,03$, что указывает на высокую пропускную способность, при этом обеспечивая худшее шумоподавление (см. табл. 1); глушитель № 4 показал приемлемый коэффициент $k = 1,18$, при этом обеспечивая хорошую акустическую эффективность (см. табл. 1); глушитель № 5, несмотря на лучшую акустическую эффективность (см. табл. 1), показал самый высокий коэффициент $k = 1,64$. Этот результат наглядно демонстрирует, что глушитель может быть высокоэффективным по шумоподавлению, но при этом значительно ограничивать пропускную способность системы.

Обсуждение. Результаты проделанных экспериментов однозначно продемонстрировали, что существует компромисс: высокая акустическая эффек-

тивность глушителя не всегда сопряжена с его высокой пропускной способностью, и наоборот. Недостаточное шумоподавление напрямую угрожает здоровью и безопасности персонала, тогда как сниженная пропускная способность негативно сказывается на производительности и эффективности работы всей пневматической системы.

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента эффективности

№	Глушитель	t_n, c	t_{κ}, c	$\Delta t, c$	k
1	Без глушителя	0,510	0,538	0,028	1,00
2	Глушитель 1	0,510	0,539	0,029	1,03
3	Глушитель 2	0,507	0,538	0,031	1,11
4	Глушитель 3	0,512	0,542	0,030	1,07
5	Глушитель 4	0,512	0,545	0,033	1,18
6	Глушитель 5	0,507	0,565	0,640	1,64

Традиционные методы диагностики состояния глушителей, основанные, например, на простом измерении противодавления (рис. 3), оказались недостаточно информативными, так как схожий характер динамики давления для различных глушителей не позволяет точно выявить тонкие изменения в их пропускной способности, вызванные, например, загрязнением, что критически важно для своевременного обслуживания. В свете этих ограничений для эффективной диагностики состояния глушителя и обеспечения оптимального баланса между шумоподавлением и пропускной способностью, необходимо внедрение аппаратно-программного комплекса, представленного на рис. 5.

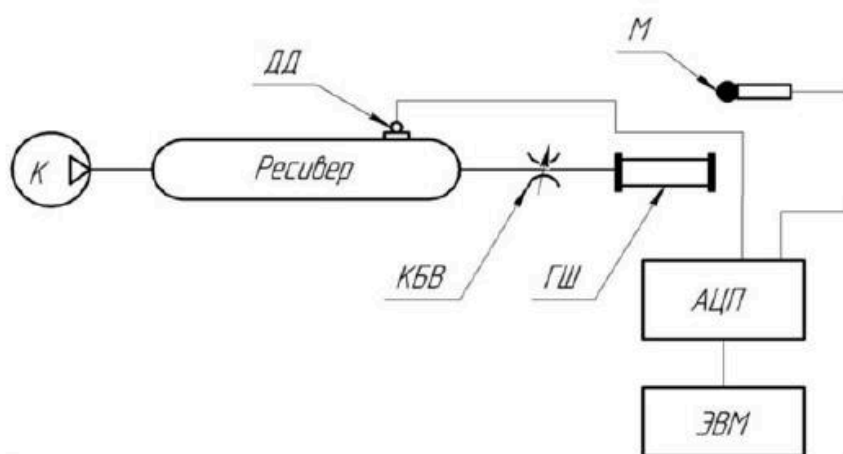


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса:

К — компрессор; ДД — датчик давления; КБВ — клапан быстрого выхлопа; ГШ — глушитель шума; М — микрофон; АЦП — аналогово-цифровой преобразователь; ЭВМ — Электронно-вычислительная машина

Такой комплекс должен быть способен в режиме реального времени оценивать ключевые параметры: акустическую эффективность и пропускную спо-

способность глушителя, используя коэффициент эффективности k . При этом программа будет сравнивать полученные данные с заданными критериями: уровень шума не должен превышать 130 дБ, а коэффициент эффективности — 1,4. В случае несоответствия этим пороговым значениям, комплекс автоматически вынесет оператору сообщение с рекомендацией о проведении замены текущего пневматического глушителя. Такой подход позволит не только поддерживать безопасные условия труда, но и гарантировать бесперебойную и высокоэффективную работу пневматических систем, предотвращая дорогостоящие простои и снижение производительности.

Заключение. Проведенное исследование успешно достигло поставленной цели, выявив ключевые аспекты работы глушителей в пневматических системах высокого давления. Полученные результаты позволяют инженерам более точно диагностировать состояние глушителей, учитывая критически важный баланс между уровнем шумоподавления и требуемым быстродействием системы. Накопленные данные обосновывают создание аппаратно-программного комплекса для мониторинга процесса в реальном времени, что, в свою очередь, будет способствовать оптимизации производственных процессов, повышению безопасности труда и продлению срока службы оборудования. Работа открывает новые перспективы для дальнейших научных исследований в области динамики пневматических систем и совершенствования методов их диагностики, позволяя перейти от реактивного обслуживания к превентивному контролю.

Список источников

- [1] Иголкин А.А., Крючков А.Н., Макарьянц Г.М. и др. *Снижение колебаний и шума в пневмогидромеханических системах*. Самара, СГАУ, 2005, 314 с.
- [2] ГОСТ 25144–82. *Пневмоглушители. Технические условия*. Москва, Изд-во стандартов, 1982, 22 с.
- [3] Заика А.В., Иголкин А.А., Решетов В.М., Сафин А.И., Сафина И.И. Разработка конструкции пневматического глушителя шума высокого давления и исследование его эффективности. *Динамика и виброакустика*, 2023, № 1, с. 22–26.
- [4] СанПиН 1.2.3685–21. *Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания*. URL: https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf (дата обращения 15.05.2025).
- [5] Баннова П.В., Иголкин А.А. Исследование характеристик глушителей шума пневмосистем. *Динамика и виброакустика машин (DVM-2024). Седьмая Международ. науч.-техн. конф.: сб. докл.* Самара, Самарский университет, 2025, с. 56–65.