

**Иголкин А.А.  
Сафин А.И.  
Стадник Д.М.  
Баляба М.В.**

Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени академика С. П. Королёва  
(Самарский университет)

Московское шоссе, д. 34,  
г. Самара, 443086,  
Российская Федерация

[igolkin.aa@ssau.ru](mailto:igolkin.aa@ssau.ru)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ВЫХЛОПА ПНЕВМОСИСТЕМ РАСЧЁТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

*Одной из основных проблем пневматических систем является шум, возникающий при сбросе сжатого воздуха, который негативно воздействует на персонал. Для создания эффективного глушителя шума необходимо прогнозировать его пропускную способность. В статье представлены результаты экспериментальных исследований пропускной способности глушителя шума с применением пористого полипропилена. Создана имитационная модель глушителя шума в составе пневмосистемы и проведены расчёты процессов изменения давления в контрольных точках. Проведены замеры шума и определена акустическая эффективность разработанного глушителя, которая составила 34,3 дБС и 32,4 дБА.*

**Ключевые слова:** пневмоглушитель; шум; динамика; система пневматическая; полипропилен

### 1 Введение

Шум пневмосистем возникает в результате сброса отработанного сжатого воздуха в атмосферу. Для снижения шума и защиты внутренних деталей распределителей используют пневмоглушители. Выбор типа глушителя зависит от ряда факторов, главными из которых являются: спектр шума источника, величина требуемого снижения шума, конструктивные особенности устройства сброса сжатого воздуха и условия его работы, допустимое противодавление или пропускная способность.

Существует ряд работ, в которых описываются исследования глушителей шума выхлопа пневмосистем. Глушитель шума должен обеспечивать сброс давления за короткое время и не разрушаться под действием газовой струи. Эти требования противоречат друг другу. Ведь для быстрого сброса давления необходимо иметь тонкую пористую стенку, которая может разрушиться.

Из многочисленных научно-исследовательских работ известны следующие основные пути снижения колеба-

ний и шума в пневматических системах [1–4]:

- снижение виброакустической активности источника;
- применение специальных корректирующих устройств и глушителей шума;
- звукоизоляция источника колебаний и шума.

Наиболее эффективный путь снижения виброакустических нагрузок – устранение их первопричины в источниках колебаний. Основными источниками шума в пневмосистемах являются выхлоп сжатого воздуха, компрессоры, трубопроводы и регулирующие клапана.

Анализ литературы показал существование двух методов снижения аэродинамического шума пневматических систем: ступенчатое дросселирование и деление потока (разбиение на мелкие струйки).

При реализации метода ступенчатого дросселирования в качестве глушителя шума используют набор перфорированных (дроссельных) шайб. Для расширения частотного диапазона акустической эффективности глушителей шума вместе с дросселирующими шайбами могут использоваться пористые материалы (спечённая

бронза, пористый алюминий, пористый волокнистый материал, упруго-пористый материал МР, пористая пластмасса и др.). В связи с большими нагрузками и возможным содержанием примесей масла в воздухе традиционные строительные пористые материалы не подходят для применения в глушителях шума. Поэтому целесообразно в глушителе шума использовать прочные и относительно простые в производстве пористые материалы [4–7]. В зависимости от исходных материалов и способа производства пористые материалы получают с пористостью до 0,98 и размером пор от долей микрометра до нескольких миллиметров.

Установка любого пористого материала на выхлопе снижает пропускную способность системы [8]. В работе [4] описана математическая модель для расчёта времени стравливания, где в качестве пористого материала использовалась спечённая бронза. Спечённая бронза в качестве звукопоглощающего элемента в пневмоглушителе подробно описана в работе [4] и дальнейшего исследования не требует. Несмотря на это, отсутствует математическое описание процесса стравливания давления через пористый полипропилен.

## 2 Цель исследования

Целью настоящего исследования является определение пропускной способности пневмоглушителя со звукопоглощающим материалом из пористого полипропилена и оценка влияния установки такого глушителя на динамику пневмосистемы.

## 3 Описание экспериментального оборудования

Пневматическая схема стенда для определения расходно-перепадной характеристики исследуемого глушителя шума показана на рисунке 1.

Стенд был собран на территории компрессорной станции Самарского универ-

ситета. Подробное описание стенда и его возможности описаны в источнике [9].

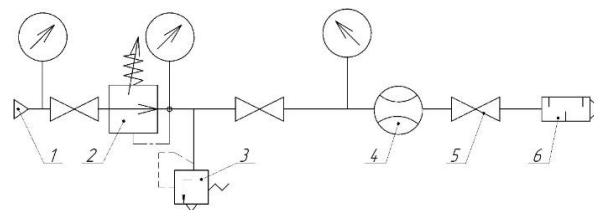


Рисунок 1. Пневматическая схема стенда

1 – источник воздуха; 2 – редуктор;  
3 – предохранительный клапан; 4 – расходомер;  
5 – отсечной кран; 6 – глушитель

Стенд питается от линии с давлением воздуха до 200 бар (рисунок 1, поз. 1). Редуктор (рисунок 1, поз. 2) понижает давление до необходимого в зависимости от входного рабочего давления испытываемого глушителя (рисунок 1, поз. 6). Для защиты системы от высокого давления предусмотрен предохранительный клапан (рисунок 1, поз. 3). После выхода из редуктора поток направляется в расходомерный участок, который состоит из манометра, измеряющего давление перед глушителем, расходомера (рисунок 1, поз. 4) и отсечного крана (рисунок 1, поз. 5).

Внешний вид пневмоглушителя в составе экспериментального стенда по определению сопротивления продуванию показан на рисунке 2.



Рисунок 2. Внешний вид пневмоглушителя в составе экспериментальной установки по определению сопротивления продуванию

Так как основной функцией глушителя является снижение шума выхлопа пневмосистемы, то были проведены исследования его акустической эффективности и сравнение уровня шума с нормативными значениями. Согласно санитарным нормам максимальными уровнями звука по шкале А, измеренными с временными коррекциями I, являются 125 дБА ( $L_{pA \max}$ ) соответ-

венно. Пиковым скорректированным по С уровнем звука ( $L_{pC peak}$ ) дБС является 137 дБС [10].

Измерения уровня шума проводились в реверберационной камере с использованием шумомера российского производителя Экофизика-110А (рисунок 3). Для замера уровня шума использовался микрофонный капсюль ВМК-402А, который позволяет измерять уровни до 170 дБ. Начальное давление в ресивере составляло 40 бар. Расстояние от источника шума до микрофона – 1 м, объём камеры для испытаний –  $30 \text{ м}^3$ .

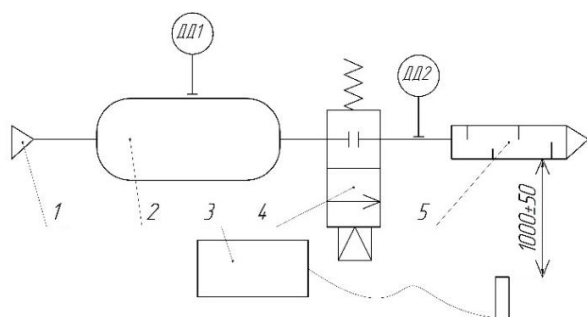


Рисунок 3. Схема проведения измерений  
1 – источник давления до 50 бар; 2 – ресивер;  
3 – шумомер; 4 – клапан быстрого выхлопа;  
5 – глушитель; ДД1 – датчик давления в ресивере;  
ДД2 – датчик давления перед глушителем

Задачи описанных измерений:

- 1) измерение основных параметров системы в исходном состоянии:
  - уровень шума, сравнение с санитарными нормами;
  - параметры, характеризующие быстродействие (время падения давления);
  - противодействие, создаваемое глушителем (давление непосредственно перед глушителем);

- 2) определение акустической эффективности.

#### 4 Имитационная модель

С целью прогнозирования влияния пневмоглушителя на динамические характеристики систем, в которых он потенциально может быть установлен, возникает необходимость в разработке его модели и её верификации. На рисунке 4 представлен

внешний вид имитационной модели стенда, разработанной в программе SimulationX.

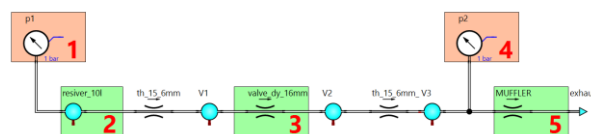


Рисунок 4. Внешний вид имитационной модели стенда для испытаний пневмоглушителя в программе SimulationX

- 1 – датчик давления в ресивере; 2 – ресивер;
- 3 – клапан; 4 – датчик давления перед пневмоглушителем; 5 – пневмоглушитель

Разработанная модель представляет собой схему с последовательным соединением таких блоков, как «полость» с адиабатным процессом и «дроссель», описываемый уравнениями Сен-Венана – Ванцеля [11, 12]. Для измерения избыточного давления в ресивере и перед пневмоглушителем используются датчики 1 и 4 соответственно. В качестве возмущающего воздействия рассматривается открытие клапана 3, имитируемого с помощью блока «дроссель». Пневмоглушитель 5, для которого определяется пропускная способность, также имитируется с помощью блока «дроссель». Характеристики рассматриваемой системы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры стенда

Наименование параметра	Значение
Объём ресивера	10 л
Пропускная способность клапана	Ду 16 мм
Пропускная способность соединительных фитингов	Ду 15,6 мм
Начальное давление в ресивере	40 бар

#### 5 Результаты исследования

В результате проведения испытаний пневмоглушителя определена его статическая характеристика, представляющая собой зависимость объёмного расхода от отношения давлений. Полученные экспериментальные данные приведены на рисунке 5 и обозначены маркерами «синий квадрат».

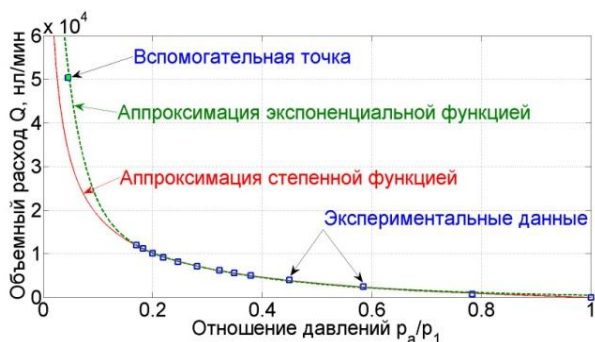


Рисунок 5. Расходно-перепадная характеристика пневмоглушителя

Помимо стационарных продувок пневмоглушителя проведены также его динамические испытания, при которых происходит сброс воздуха из ресивера посредством резкого открытия клапана. Полученные результаты представляют собой графики переходных процессов изменения давления в ресивере и перед пневмоглушителем (рисунки 6–7). После открытия клапана наблюдается быстрое повышение давления перед глушителем, уровень которого определяется гидравлическим сопротивлением последнего (рисунок 7).

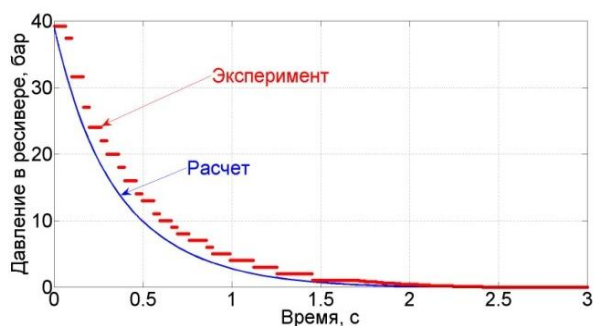


Рисунок 6. Изменение давления в ресивере при внезапном открытии клапана

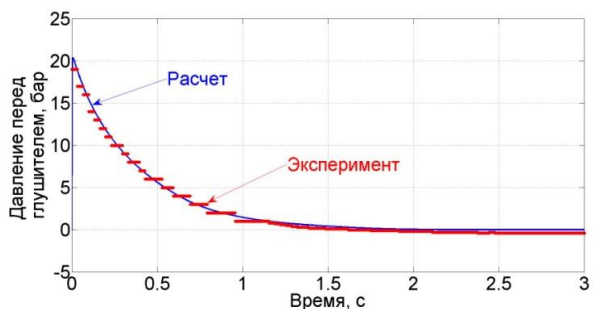


Рисунок 7. Изменение давления перед глушителем при внезапном открытии клапана

Полученные в результате динамических испытаний пневмоглушителя экспериментальные данные на рисунках 6–7 обозначены маркерами красного цвета.

Аппроксимация экспериментальных данных выполнена с помощью инструментов программы Matlab. В начальном приближении экспериментальные данные, представленные на рисунке 5, аппроксимированы с помощью степенной функции. Однако найденная функция при последующей её подстановке в имитационную модель даёт погрешность более 30%, что связано с неточностью экстраполяции в области больших перепадов давления (при отношении давления на пневмоглушителе менее 0,15). Для уточнения аппроксимирующей функции в области больших перепадов использована вспомогательная точка, которая получена следующим образом. С помощью имитационной модели подобран такой  $K_v$  глушителя, при котором происходит удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных данных. При этом вспомогательная точка соответствует режиму, при котором наблюдается максимальное давление перед пневмоглушителем и расход через него.

В результате с учётом вспомогательной точки получена зависимость расхода через глушитель от отношения давлений на нём, имеющая вид экспоненциальной функции:

$$Q = a \cdot e^{b\beta} + c \cdot e^{d\beta}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  – коэффициенты экспоненциальной функции;  $\beta = \frac{p_a}{p_a + p_1}$  – отношение давлений;

$p_a$  – атмосферное давление;  $p_1$  – избыточное давление перед глушителем. Зависимость (1) с коэффициентами  $a = 1.2044 \cdot 10^5$ ,  $b = -27.0859$ ,  $c = 2.0391 \cdot 10^4$ ,  $d = -3.7601$  описывает экспериментальные данные с достоверностью  $R^2 = 0.9998$ .

Использование подхода с добавлением результатов динамических испытаний к стационарным продувкам, позволяет полу-

чать расчётные данные, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными в широком диапазоне перепадов давления.

Для анализа работы других глушителей (глушитель из пористого алюминия производства ООО «Композиционные материалы», Россия, серия ГР-SW-HP, и глушитель SMC Corp., Япония, VCHNF4-10) была проведена серия испытаний по измерению спада давления при резком открывании клапана (рисунки 8, 9). По результатам проведения испытаний видно, что время спада давления у всех типов глушителей практически одинаково, но противодействие непосредственно перед глушителем самое высокое у SMC. Это связано с тем, что внутри глушителя SMC установлена трубка с отверстиями для снижения эффекта охлаждения.

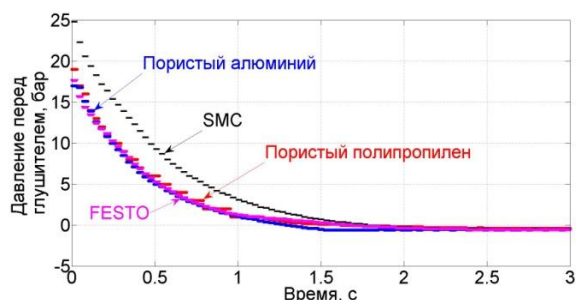


Рисунок 8. Изменение давления перед глушителем при внезапном открытии клапана

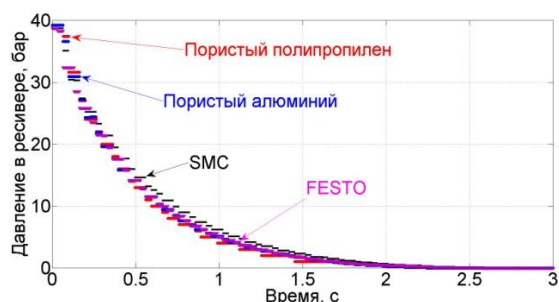


Рисунок 9. Изменение давления в ресивере при внезапном открытии клапана

## 6 Акустическая эффективность

В результате проведённых измерений глушителя (рисунок 10) были получены

следующие экспериментальные данные (рисунок 11).



Рисунок 10. Внешний вид глушителя шума

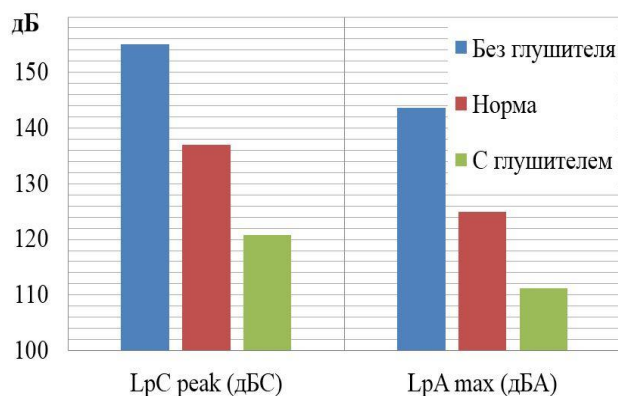


Рисунок 11. Уровень звукового давления глушителя шума

Из графиков на рисунке 11 видно, что использование глушителя шума позволяет снизить уровень шума до 34,3 дБС и 32,4 дБА, что соответствует нормам [10, 13].

## 7 Заключение

Таким образом, в работе были проведены экспериментальные исследования пропускной способности глушителя шума. Создана имитационная модель глушителя шума в составе пневмосистемы и проведены расчёты процессов изменения давления в контрольных точках. Полученные расчётные данные имеют хорошую сходимость с экспериментальными результатами. Следовательно, разработанная имитационная модель может быть использована при оптимизации конструктивных параметров глушителя. Противодействие с

глушителем составило 20 бар, что не превышает зарубежные аналоги. Проведены замеры шума и определена акустическая эффективность глушителя, которая составила 34,3 дБС и 32,4 дБА, что соответствует санитарным нормам по шуму.

## 8 Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации Программы развития Самарского университета на 2021- 2030 годы в рамках программы «Приоритет-2030» при поддержке Правительства Самарской области.

## Список использованных источников

[1] Будаев, В. А., Глушители аэродинамического шума для станочных приспособлений [Текст] / В. А. Будаев, Е. А. Крайнова // Вестник машиностроения. – 2001. – №2. – С. 272-276.

[2] ГОСТ 25144 – 82. Пневмоглушители. Технические условия [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.

[3] Igolkin, A. A. Muffler of exhaust air [Text] / A. A. Igolkin // 21st International Congress on Sound and Vibration. – 2014. – P. 2027-2034.

[4] Jingxiang, L. Study on acoustical properties of sintered bronze porous material for transient exhaust noise of pneumatic system [Text] / L. Jingxiang, Z. Shengdun, I. Kunihiro // Journal of Sound and Vibration. – 2013. – No 332. – P. 2721-2734.

[5] Финкельштейн, А. Б. Теория и практика получения пористых отливок из алюминиевых сплавов пропиткой [Текст]: дис. ... докт. техн. на-

ук: 05.16.04 / Финкельштейн Аркадий Борисович. – Екатеринбург, 2010. – 338 с.

[6] Finkel'stein, A. B. Acoustic characteristics of porous cast aluminum [Text] / A. B. Finkel'stein, I. S. Kazantsev, V. G. Starkov // Life safety. – 2006. – №4. – P. 21-23.

[7] The Study of Muffler Parameters Influence on Pressure Regulator Dynamics and Acoustic Characteristics [Electronic resource] / A. A. Igolkin, D. M. Stadnik, E. V. Shakhmatov [et al.] // Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration. – Athens, Greece. – 10-14 July 2016.

[8] ГОСТ Р ЕН 29053 – 2008. Материалы акустические. Методы определения сопротивления продуванию потоком воздуха [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 2008. – 14 с.

[9] Баляба, М. В. Разработка гасителей пульсаций для систем регулирования давления природного газа [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Баляба Максим Владимирович. – Самара, 2019. – 154 с.

[10] СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Текст]. – Введ. 2021-01-28. – КонсультантПлюс, 2021. – 1143 с.

[11] Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем [Текст] / Д. Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1974. – 424 с.

[12] Аброрович, Г.Н., Прикладная газовая динамика [Текст] / Д. Н. Попов. – М.: Наука, 1991. – 600 с.

[13] СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки [Текст]. – Введ. 1996-10-31. – М.: Стандартинформ, 1996. – 19 с.

**DETERMINATION OF THE CAPACITY OF THE EXHAUST NOISE MUFFLER OF PNEUMATIC SYSTEMS BY COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL METHODS**

**Igolkin A.A.**

**Safin A.I.**

**Stadnik D.M.**

**Balyaba M.V.**

Samara National Research University  
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse,  
Samara, 443086,  
Russian Federation

[igolkin.aa@ssau.ru](mailto:igolkin.aa@ssau.ru)

*One of the main problems of pneumatic systems is the noise that occurs when compressed air is discharged, which negatively affects personnel. To create an effective noise muffler, it is necessary to predict its throughput. The article presents the results of experimental studies of the bandwidth of a noise muffler using porous polypropylene. A simulation model of a noise muffler as part of a pneumatic system has been created and calculations of pressure changes at control points have been carried out. Noise measurements were carried out and the acoustic efficiency of the developed muffler was determined, which amounted to 34.3 dBC and 32.4 dBA.*

**Keywords:** noise muffler; noise; dynamics; pneumatic system; polypropylene

## References

- [1] Budaev, V. A., Aerodynamic noise mufflers for machine tools [Text] / V. A. Budaev, E. A. Kraynova // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2001. – № 2. – P. 272-276. (in Russian).
- [2] GOST 25144 – 82. Pneumatic silencers. Technical conditions [Text]. – M.: Publishing House of Standards, 1982. – 22 p. (in Russian).
- [3] Igolkin, A. A. Muffler of exhaust air [Text] / A. A. Igolkin // 21st International Congress on Sound and Vibration. – 2014. – P. 2027-2034.
- [4] Jingxiang, L. Study on acoustical properties of sintered bronze porous material for transient exhaust noise of pneumatic system [Text] / L. Jingxiang, Z. Shengdun, I. Kunihiro // Journal of Sound and Vibration. – 2013. – № 332. – P. 2721-2734.
- [5] Finkel'stein, A. B. Theory and practice of obtaining porous castings from aluminum alloys by impregnation [Text] / A. B. Finkel'stein // dissertation of the Doctor of Technical Sciences. – Ural Federal University. – 2010. – 338 p. (in Russian).
- [6] Finkel'stein, A. B. Acoustic characteristics of porous cast aluminum [Text] / A. B. Finkel'stein, I. S. Kazantsev, V. G. Starkov // Life safety. – 2006. – № 4. – P. 21-23.
- [7] The Study of Muffler Parameters Influence on Pressure Regulator Dynamics and Acoustic Characteristics [Electronic resource] / A. A. Igolkin, D. M. Stadnik, E. V. Shakhmatov [et al.] // Proceedings of the 23d International Congress on Sound and Vibration. – Athens, Greece. – 10-14 July 2016.
- [8] GOST R EN 29053. – 2008 Acoustic materials. Methods for determining the resistance to air flow blowing [Text]. – Introduction 2008-03-13. – Moscow: Publishing House of Standards, 2008. – 14 p. (in Russian).
- [9] Balyaba, M. V. Development of pulsation dampers for natural gas pressure control systems [Text] / M. V. Balyaba // dissertation of the Candidate of Technical Sciences. – Samara University. – 2019. – 154 p. (in Russian).
- [10] SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans [Text]. – Introduction 2021-01-28. – Consultant Plus, 2021. – 1143 p. (in Russian).
- [11] Popov, D. N. Dynamics and regulation of hydro and pneumatic systems [Text] / D. N. Popov. – M.: Mechanical engineering, 1974. – 424 p. (in Russian).
- [12] Abromovich, G.N., Applied gas dynamics [Text] / D.N. Popov. – M.: Nauka, 1991. – 600 p. (in Russian).
- [13] SN 2.2.4/2.1.8.562-96. Noise in workplaces, in residential, public buildings and on the territory of residential development [Text]. – Introduction 1996-10-31. – M.: Publishing House of Standards, 1996. – 19 p. (in Russian).