

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ВЫПУСКА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ALLBEA NOISE

© 2025

Р. Э. Дадашов аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания;
Уфимский университет науки и технологий;
reshad.dadashov85@mail.ru

А. А. Черноусов кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей
внутреннего сгорания;
Уфимский университет науки и технологий;
andrei.chernousov@mail.ru

Представлена расчётная методика снижения шума выпуска поршневого двухтактного двигателя. По этой методике проведён анализ системы выпуска в программе *ALLBEA*. Выполнена оптимизация системы выпуска отработавших газов в программе *ALLBEA NOISE*. Сравнение рассчитанных по методике показателей двигателя с оптимизированным глушителем с показателями двигателя с серийной системой выпуска показало уменьшение на 17 дБ уровня звукового давления на выпуске при незначительном уменьшении мощности (менее чем на 3%) на частоте вращения вала 5500 об/мин.

Двухтактный двигатель; шум; глушители; имитационное моделирование; оптимизация.

Цитирование: Дадашов Р.Э., Черноусов А.А. Анализ и оптимизация глушителя шума выпуска поршневого двигателя с применением ALLBEA NOISE // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 1. С. 94-101. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-94-101

Актуальность темы исследования

В современных условиях урбанизации и увеличения числа транспортных средств проблема шума становится все более актуальной. Одним из основных источников шума является выпускная система поршневого двигателя, что требует эффективных подходов к снижению шума без потерь мощности.

В настоящей работе применён «газодинамический» подход к снижению шума выпуска форсированного двухтактного двигателя без наддува. Исследование носило теоретический характер, содержанием его были сравнительные и оптимизационные расчёты. Применены программы из пакета ALLBEA (инструменты NOISE и OPTIM) в качестве программ для расчётной оценки и оптимизации параметров глушителя шума выпуска. Применение этих программ позволило оценить потенциал «газодинамического» подхода для улучшения акустических характеристик глушителей шума выпуска.

Исследования, направленные на анализ и оптимизацию глушителя шума выпуска с применением ALLBEA NOISE и ALLBEA OPTIM, могут быть востребованы для повышения комфорта и экологической безопасности наземных транспортных средств. Методика и сам подход будут применимы к задачам повышения тактико-технических характеристик беспилотных летательных аппаратов с двигателями внутреннего сгорания такого типа.

Постановка задачи

Рассматривается задача расчёта уровня шума выпуска двухтактного двигателя с серийным глушителем с применением моделей процесса в 1D и 2D. На этой основе предполагается выполнить оптимизацию параметров глушителя с теми же габаритами и неизменной выпускной системой с газодинамической настройкой, а также сравнить расчётные значения уровней шума выпуска с серийным и оптимизированным глушителем.

Расчётная методика оценки уровня шума

Исследование было выполнено с применением расчётной методики, в которой уровень шума на выпуске оценивается численными расчётами по 1D и 2D моделям. В рамках данного исследования была выполнена расчётная оптимизация параметров переходных каналов и камер глушителя с целью уменьшения уровня шума на выходе из глушителя.

Использование глушителя шума выпуска снижает интенсивность колебаний газового потока на выходе из газовоздушного тракта, тем самым уменьшая уровень звукового давления. От глушителя требуется преобразовать поток с пульсациями в стационарный и снизить среднюю скорость и пульсации скорости потока газов, истекающих в атмосферу.

В конструкции глушителя может быть заложен «газодинамический» подход [1]. При таком подходе проточная часть глушителя включает ряд камер, которые соединены между собой относительно длинными каналами. Эти каналы выполняют функцию задержки распространения волны давления к последней камере глушителя, для ослабления возмущений при перетекании в ту же камеру газов через отверстия и короткие соединительные элементы. При данном подходе пульсации потока ослабевают, используя в основном волновые, а не диссипативные эффекты.

1D модель двигателя была построена в программном пакете ALLBEA выпуска 2023 г. [2], включающем программы ALLBEA OPTIM и ALLBEA NOISE, созданные в Уфимском университете науки и технологий.

На рис. 1 показана структурная схема 1D модели процессов в газовоздушном тракте (ГВТ) двигателя в графической среде ALLBEA.

Модель содержит модели отдельных элементов (каналов и ёмкостей, включая кривошипные и рабочие камеры двигателя), а также модели соединений (местных сопротивлений, обратных пластинчатых клапанов, газообменных окон и «тройников») из библиотеки моделей пакета ALLBEA.

Показатели двигателя по 1D модели были сравнены с показателями, измеренными на стенде. Точность была признана удовлетворительной. Особых требований к точности оценок абсолютных значений уровня звукового давления не предъявлялось, т. к. модель предназначалась для сравнительных расчётов.

Шум выпуска оценивался уровнем звукового давления вблизи выхода из выпускной системы (рис. 2) по значению эффективного звукового давления $p_{эф}$. Последнее определяется как среднеквадратическое отклонение давления $p(t)$ от давления p_a в невозмущённой среде (или, что более строго – среднего $p_a = p_{cp}$ в той же точке):

$$p_{эф} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} [p(t) - p_a]^2 dt}, \quad p_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} p(t) dt,$$

где τ – время усреднения. Для периодических сигналов выбирают τ равным целому числу периодов и на практике $p_{эф}$ вычисляют дискретной аппроксимацией:

$$p_{эф} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p_a)^2}, \quad (1)$$

где N – число отсчётов давления p_i , взятых с равным шагом в интервале τ .

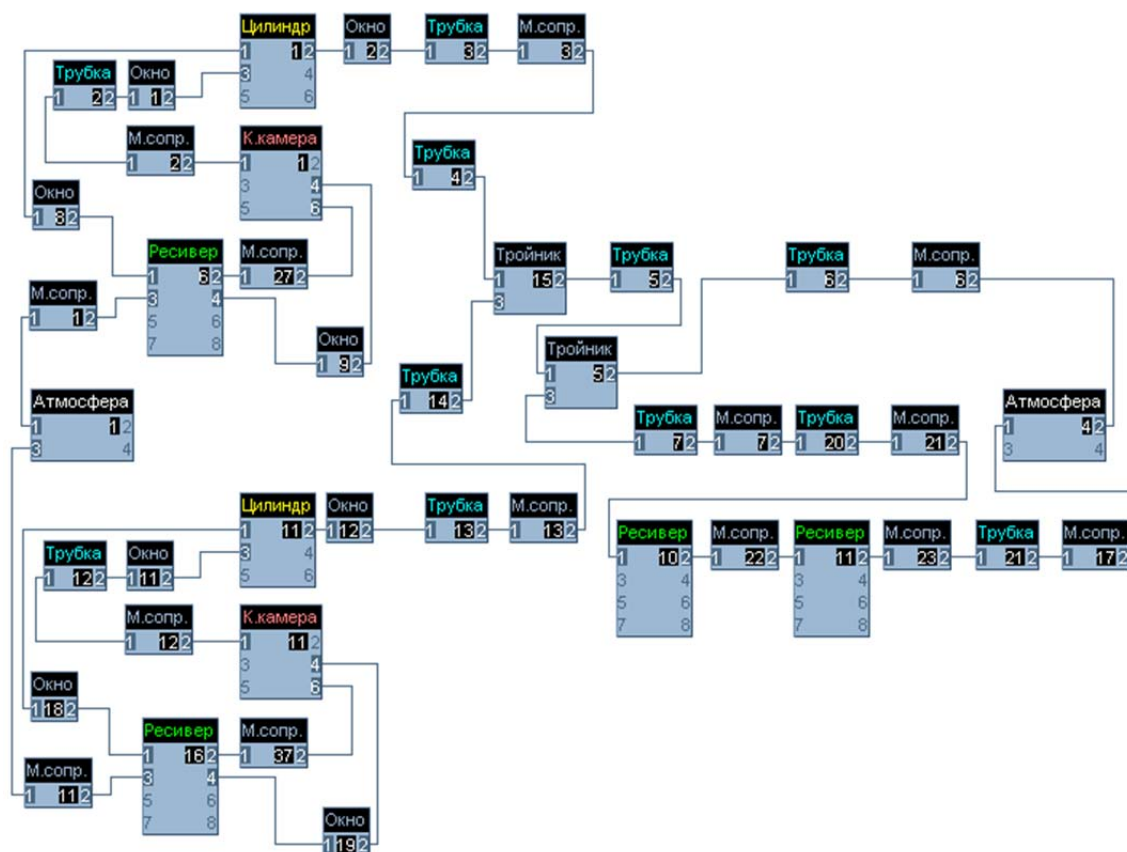


Рис. 1. Структура схемы 1D модели РМЗ-55I в ALLBEA

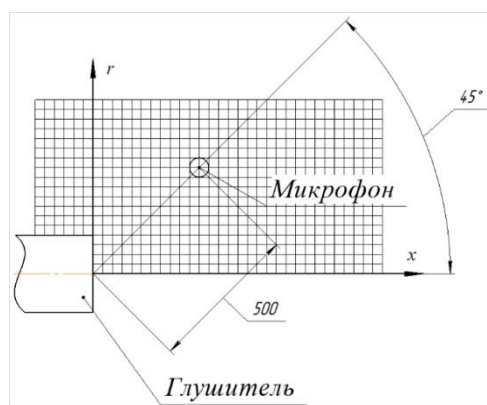


Рис. 2. Расположение микрофона за срезом выпускного патрубка глушителя

Уровень звукового давления L – логарифм отношения $p_{\text{эф}}$ к опорному давлению p_0 , соответствующему порогу слышимости в воздухе ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па):

$$L = 20 \cdot \lg \left(\frac{p_{\text{эф}}}{p_0} \right), \quad (2)$$

а значение L по (2) выражается в децибелах (дБ) [1; 3; 4].

В программе ALLBEA отсутствует встроенная модель микрофона, поэтому для расчёта уровня звукового давления L в точке расположения микрофона шумомера применяется специализированная методика, разработанная на кафедре двигателей внутреннего сгорания Уфимского государственного авиационного технического университета. Эта методика предназначена для оценки и оптимизации характеристик глушителей шума выпуска. Точка для измерений L (в методике: расчётная точка) располагается на расстоянии 500 мм от среза выходного патрубка глушителя и под углом 45 градусов к его оси [3; 4] (рис. 2).



Рис. 3. Поле давления из 2D расчёта

Действуя по этой методике, вначале выполняют по 1D модели численный расчёт процессов в ГВТ двигателя, получая массивы переменных скорости u_j и температуры T_j на срезе патрубка. Задавая эти данные программе ALLBEA NOISE [5], численно рассчитывают по осесимметричной 2D модели на сетке с прямоугольными ячейками возмущение в окружающем воздухе (рис. 3). Обработкой по (1) и (2) массива значений переменного давления p_i из расчёта в ALLBEA NOISE (в точке расположения микрофона) получают уровень звукового давления L .

Оптимизация системы выпуска

Для расчётов была модифицирована структура 1D модели, представленная на рис. 4. В модель ГВТ добавлен канал круглого сечения, соединяющий две камеры глушителя. Оптимизация осуществлялась в программе ALLBEA OPTIM [6]. Используя генетический алгоритм, программа находит глобальный максимум целевой функции (ЦФ) с учётом ограничений. Программу настраивают на конкретную задачу оптимизации, задавая ей ряд параметров (рис. 5 – 7) и подключая внешний программный модуль, в котором запрограммированы все действия по вычислению ЦФ.

Целевая функция задавалась как:

$$f(V_1, L_T, D_T, D_{отв}) = \frac{100}{\Delta u_{ср.кв}}, \quad (3)$$

где V_1 – объём первой из двух камер глушителя; L_T – длина канала, соединяющего камеры; D_T – его диаметр; $D_{отв}$ – диаметр соединяющего камеры отверстия в перегородке; $\Delta u_{ср.кв}$ – среднеквадратическое отклонение скорости потока газов на срезе выходного патрубка глушителя от средней скорости потока на этом срезе:

$$\Delta u_{cp,KB} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (u_j - u_{cp})^2}, \quad (4)$$

$$u_{cp} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M u_j, \quad (5)$$

где M – число шагов в 1D расчёте за период τ изменения величин на срезе патрубка.

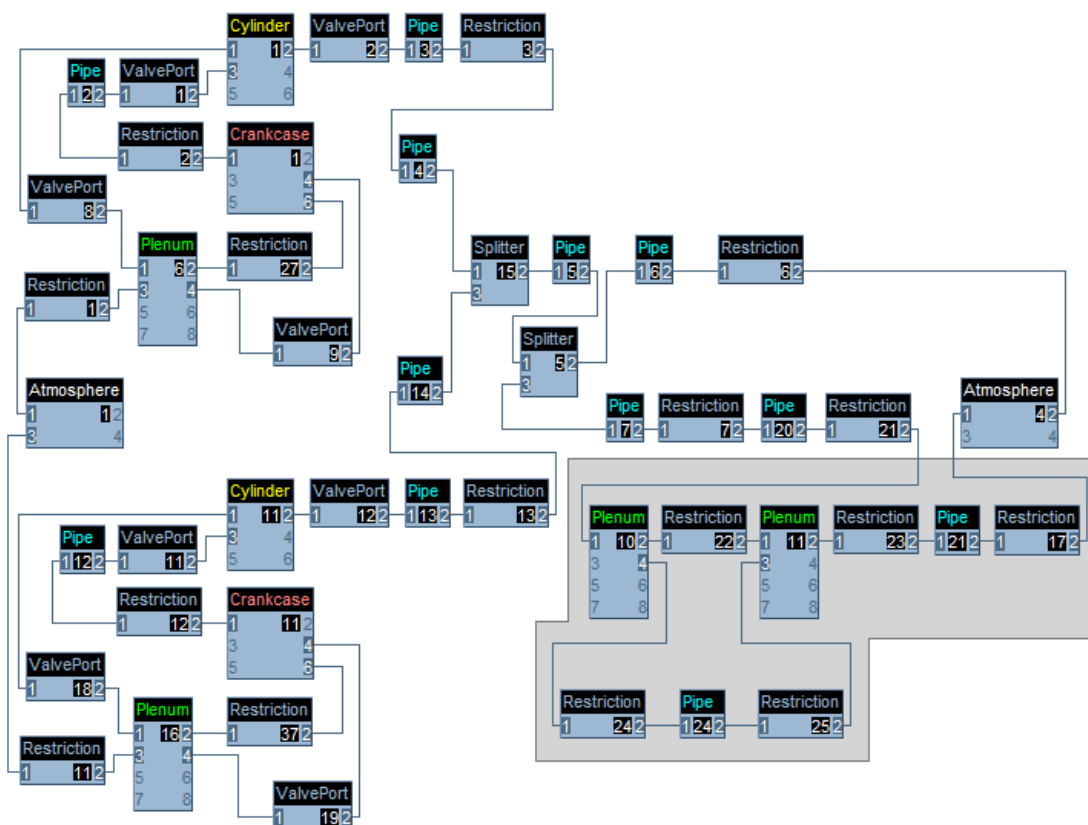


Рис. 4. Модифицированная 1D модель PM3-551i

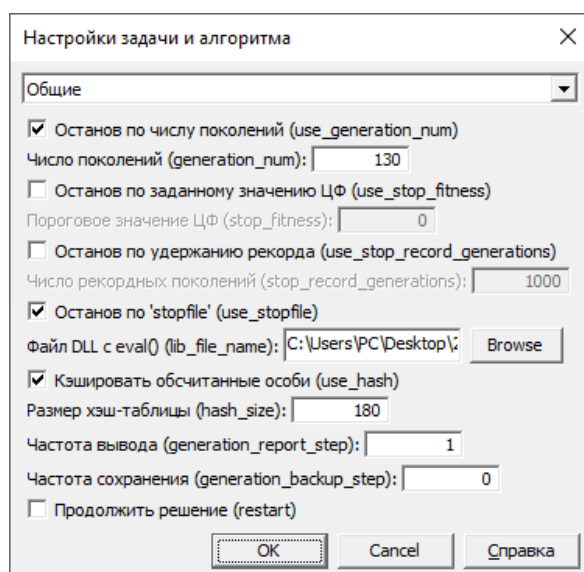


Рис. 5. Общие настройки оптимизации по генетическому алгоритму

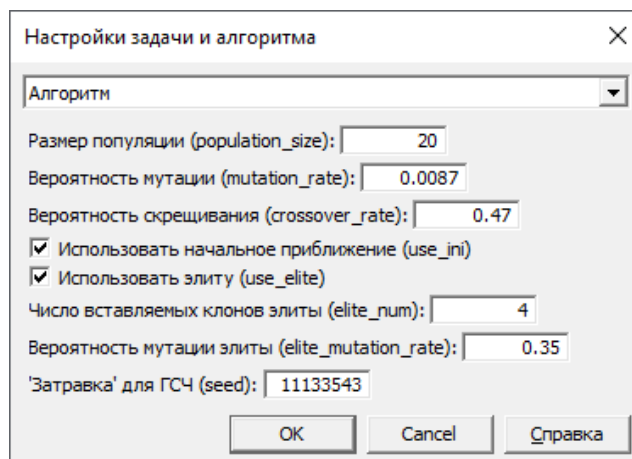


Рис. 6. Настройки алгоритма

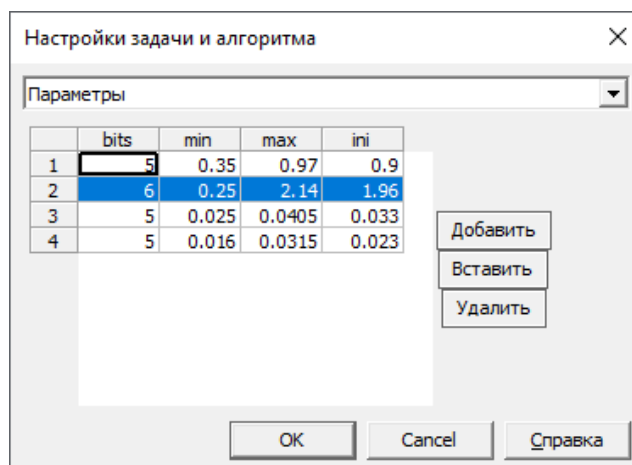


Рис. 7. Настройка диапазонов оптимизируемых параметров

Было установлено ограничение на мощность двигателя: она не должна быть более чем на 3% ниже расчётной мощности с серийным глушителем. Оптимизация проводилась на режиме полной мощности при частоте вращения вала 5500 об/мин. Решение задачи автоматизировали с помощью программы ALLBEA OPTIM, к которой подключали разработанный на языке C++ модуль вычисления значений ЦФ. Реализованный в ALLBEA OPTIM алгоритм автоматически подбирал параметры глушителя с наилучшими показателями снижения шума и без существенной потери мощности двигателя.

Основные результаты и перспективы развития работы

Оптимизация дала: $V_1/(V_1 + V)_2 = 0,638$; $L_T = 1,81$ м; $D_T = 25$ мм; $D_{отв} = 16,5$ мм.

По результатам расчётной оценки эффективности глушителя с «настроенным» длинным каналом между камерами было установлено, что применение данного устройства позволяет снизить уровень шума выпуска на величину от 5,2 до 17,7 децибел (во всем диапазоне частот вращения) по сравнению с серийным двухкамерным глушителем. При этом расчётная мощность двигателя (которая уменьшилась не более чем на 3% для найденного при 5500 об/мин оптимума) по рассчитанной скоростной характеристике (рис. 8) изменяется весьма существенно.

Следует отметить также, что методика, применённая в работе, имеет ограничения и требует дополнительных экспериментальных исследований для подтверждения полученных результатов и уточнения теоретических предпосылок. Несмотря на это, данная методика может быть рекомендована к применению для оперативных оценок и расчётной оптимизации глушителей, функционирующих на основе волновых эффектов. Также следует отметить необходимость совершенствования программных средств для повышения точности расчётных оценок акустических характеристик двигателей внутреннего сгорания.

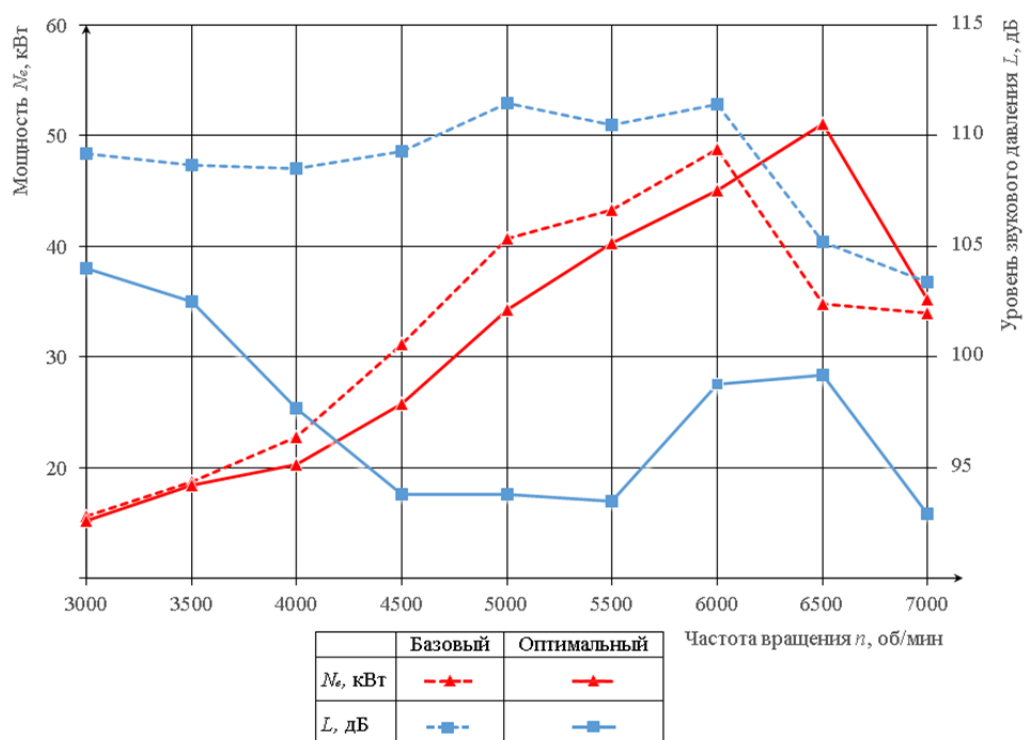


Рис. 8. Расчётные показатели для базового и оптимального глушителей

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FEUE-2023-0007 (УУНиТ).

Библиографический список

1. Рудой Б.П., Вахитов Ю.Р. Снижение газодинамического шума циклических и импульсных энергоустановок. Уфа: УГАТУ, 2008. 183 с.
2. Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Пакет прикладных программ ALLBEA для моделирования и оптимизации процессов энергетических установок // Двигателестроение. 2023. № 4 (294). С. 3-15. DOI: 10.18698/jec.2023.4.3-15
3. ГОСТ Р 52231-2004. Внешний шум автомобилей в эксплуатации. Допустимые уровни и методы измерения. М.: Стандартинформ, 2006. 6 с.
4. Miles R.N. Physical approach to engineering acoustics. Springer, 2020. 392 p. DOI: 10.1007/978-3-030-22676-3

5. Черноусов А.А. Программа для расчёта возмущений в газе вокруг среза трубы: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024667228; опубл. 22.07.2024; бюл. № 8.

6. Черноусов А.А. Программа ALLBEA OPTIM для оптимизации параметров по генетическому алгоритму: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021666333; опубл. 13.10.2021; бюл. № 10.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF PISTON ENGINE EXHAUST NOISE SILENCER USING ALLBEA NOISE

© 2025

R. E. Dadashov Postgraduate Student of the Internal Combustion Engines Department;
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;
reshad.dadashov85@mail.ru

A. A. Chernousov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor
of the Internal Combustion Engines Department;
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;
andrei.chernousov@mail.ru

This study presents a computational method for reducing exhaust noise in a two-stroke piston engine. The exhaust system was analyzed using the ALLBEA software package, and its optimization was performed using the ALLBEA NOISE program. A comparison of the calculated engine performance with the optimized silencer and the stock exhaust system demonstrated a 17 dB reduction in sound pressure level at the exhaust outlet, with only a minor power loss (less than 3%) at the shaft speed of 5500 rpm.

Two-stroke engine; mufflers; noise; simulation modeling; optimization

Citation: Dadashov R.E., Chernousov A.A. Analysis and optimization of piston engine exhaust noise silencer using ALLBEA NOISE. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 1. P. 94-101. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-94-101

References

1. Rudoy B.P., Vakhitov Yu.R. *Snizhenie gazodinamicheskogo shuma tsiklicheskih i impul'snykh energoustanovok* [Reduction of gas-dynamic noise of cyclic and pulse power plants]. Ufa: UGATU Publ., 2008. 183 p.
2. Enikeev R.D., Chernousov A.A. ALLBEA application software package to simulate and optimize processes in the energy systems. *Engines Construction*. 2023. No. 4 (294). P. 3-15. (In Russ.). DOI: 10.18698/jec.2023.4.3-15
3. GOST R 52231-2004. External noise of motor vehicles. Permissible levels and methods of measurement. Moscow: Standartinform Publ., 2006. 6 p. (In Russ.)
4. Miles R.N. Physical approach to engineering acoustics. Springer, 2020. 392 p. DOI: 10.1007/978-3-030-22676-3
5. Chernousov A.A. *Programma dlya rascheta vozmushcheniy v gaze vokrug sreza truby* [Software for calculating disturbances in gas around the pipe cut]. Certificate of state registration of computer program no. 2024667228, 2024. (Publ. 22.07.2024, bull. no. 8)
6. Chernousov A.A. *Programma ALLBEA OPTIM dlya optimizatsii parametrov po geneticheskomu algoritmu* [ALLBEA OPTIM software for optimizing parameters using genetic algorithm]. Certificate of state registration of computer program no. 2021666333, 2021. (Publ. 13.10.2021, bull. no. 10)