

Антонов И. В.

студент

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, г. Красноярск

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ГЛУШИТЕЛЬ ВЫХЛОПНОЙ СИСТЕМЫ ДГУ С ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ 40 ДБ

Аннотация. Данная статья посвящена разработке глушителя для выхлопной системы дизельной генерирующей установки мощностью 1800 кВт, обеспечивающего снижение уровня шума на 40 дБ. В основу предложенной конструкции положен сепарационный принцип, применяемый в оружейных глушителях, а также интерференционная камера, в которой два газовых потока, проходя через перфорированные отверстия, сталкиваются друг с другом. В работе рассмотрены принцип действия устройства, численный расчёт методом конечных элементов в пакете COMSOL Multiphysics и возможные сферы его практического использования.

Ключевые слова: Глушитель, выхлопная система, дизельная генерирующая установка, численное моделирование, снижение шума.

Antonov I.V.

student

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk,
Russian Federation*

INTERFERENCE MUFFLER OF THE EXHAUST SYSTEM OF THE DISEL GENERATOR SET WITH AN EFFICIENCY OF 40 DB

Abstract. This paper is devoted to the development of a muffler for the exhaust system of an 1800 kW diesel generating unit, which reduces noise levels by 40 dB. The proposed design is based on the separation principle used in weapon silencers, as well as an interference chamber in which two gas streams passing through perforated holes collide with each other. The paper considers the principle of operation of the device, numerical calculation by the finite element method in the

Keywords: Muffler, exhaust system, diesel generating unit, numerical simulation, noise reduction.

Введение

Защита окружающей жилой застройки от акустического воздействия дизельной генерирующей установки (ДГУ) требует разработки и внедрения комплекса мер, направленных на снижение шума у источника его возникновения, на пути распространения и в зоне восприятия. Нормируемый уровень звукового давления ДГУ установлен ГОСТ 12.1.003-83 и составляет 85 дБ. Основным источником шума подобных установок считается выпускная система двигателя, через которую происходит эмиссия высокоуровневого шума отработавших газов. Для подобных условий эксплуатации предъявляется повышенное требование к использованию высокоэффективного глушителя.

Цель исследования: Продемонстрировать уникальную конструкцию спроектированного наиболее оптимального глушителя выпускной системы ДГУ по таким техническим характеристикам как: габаритные размеры, уровень снижения шума, расходу газа и цене изготовления.

Материал и методы исследования

В качестве дизельной генерирующей установки рассматриваемой для исследования глушителя была выбрана FB2250-R-150-C02 (1800кВт) на базе двигателя Mitsubishi S16R2-PTAW-C. Основные данные установки необходимые для расчета представлены в табл.1.

Табл.1. Основные параметры расчета глушителя.

Параметры	Значение	Ед. изм.
Температура выхлопных газов, $T_{\text{газ}}$	550	°C
Расход выхлопных газов, $Q_{\text{газ}}$	445	м ³ /мин
Диаметр выходного патрубка с турбины, D_p	360	мм
Максимальное противодавление	600	мм.вод.столба

выхлопа	0.0588399	(бар)
Звуковое давление на входе в глушитель	110	дБ
Атмосферное давление	1,01325	бар
Частотный диапазон шума	От 100 до 3000	Гц

Источник: данные с технических характеристик S16R2-PTAW-C

Ключевая концепция разработки представленного глушителя заимствована из оружейных глушителей и иностранной публикации, посвященной исследованию конструкции, в которой применяются сепараторы для разделения звуковых волн. Изображение глушителя представлено на рис.1.

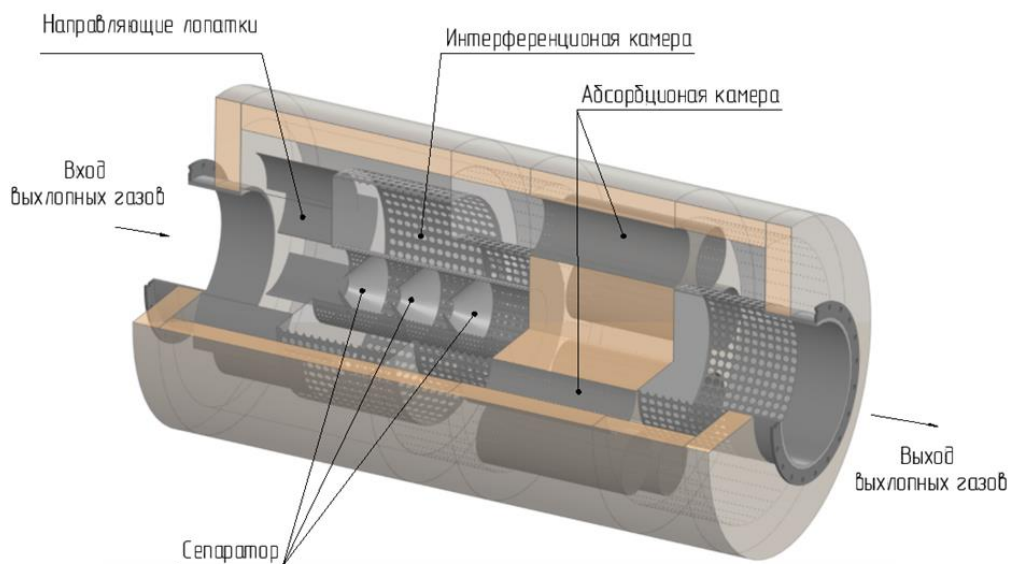


Рис.1. Глушитель выхлопной системы.

Источник: иллюстрация автора

В данном исследовании используются тетраэдрические элементы сетки с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*.

Для решения акустики используется уравнение потери передачи звуковой энергии и формула интенсивности звуковой волны.

Уравнение потери передачи звуковой энергии:

$$TL = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right); \quad (1)$$

где TL или ΔL обозначает снижение интенсивности звукового давления при прохождении через глушитель или преграду, измеряется в дБ, P_{in} и P_{out} – давление на входе и выходе глушителя соответственно

Формула интенсивности звуковой волны:

$$P = \frac{p_0^2}{2\rho c} \cdot S; \quad (2)$$

где p₀- звуковое давление в Па; ρ-плотность среды; c - скорость звука среды в м/с.

Максимальная длина элемента рассчитывается с учётом волнового числа и длины волны. Для анализа методом конечных элементов необходимо сохранить по четыре элемента для каждой длины волны.

Расчет длины волны:

$$\lambda = \frac{a}{f}; \quad (3)$$

где λ – длина волны, a – скорость звука, f – максимальна частота.

Скорость звука в воздухе для температуры в 550 градусов:

$$a = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8,31 \cdot 823}{0,029}} = 574,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (4)$$

где μ=0,029 кг/моль (молярная масса воздуха); R=8,31 Дж/(моль · К) (универсальная газовая постоянная); γ=1,4 (отношение молярных теплоемкостей для воздуха).

Максимальная длина элемента:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{574,6/3000}{4} = 0,04788;$$

Для численного исследования турбулентных течений в глушителе используется метод осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Данный подход является основой подавляющего большинства

инженерных расчетов в вычислительной гидродинамике (CFD), поскольку позволяет получить осредненные характеристики потока с приемлемой точностью при относительно низких вычислительных затратах. Однако, учитывая высокую степень перфорации и сложную геометрию внутренних камер глушителя, использование полноценной модели турбулентности в рамках трехмерной постановки приводит к значительному увеличению требуемых вычислительных ресурсов.

В связи с этим в настоящей работе турбулентная модель отключена, что соответствует настройке "Turbulence model type = None" в интерфейсе Laminar Flow в COMSOL Multiphysics. При этом расчет производится по уравнениям ламинарного течения, которые, при использовании достаточно подробной сетки и эффективных схем стабилизации, позволяют корректно описывать осредненные характеристики потока в условиях развитой турбулентности. Эффективная вязкость в таком подходе включает как молекулярную вязкость газа, так и вклад, связанный с диссипацией энергии на перфорированных элементах конструкции.

- Уравнение неразрывности.

Движение газа в проточной части глушителя описывается уравнением неразрывности, отражающим закон сохранения массы. В наиболее общей форме уравнение неразрывности записывается как:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0; \quad (5)$$

где ρ – плотность газа, $\mathbf{u}$ – вектор скорости, t – время.

- Уравнение сохранения кол-ва движения (Навье-Стокса).

Динамика потока в каналах глушителя описывается системой уравнений Навье-Стокса для сохранения количества движения. В Comsol Multiphysics реализована следующая форма этих уравнений:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}; \quad (6)$$

где $\mathbf{u}$ – вектор скорости (м/с), ρ – плотность газа (кг/м³), p – статическое

давление (Па), μ – динамическая вязкость газа (Па·с), I – единичный тензор, F – вектор объемных сил (Н/м³).

Для стационарного случая, рассматриваемого в данной работе, локальное ускорение отсутствует, и уравнение принимает вид:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F;$$

Для замыкания системы уравнений необходим вид тензора вязких напряжений K . В COMSOL Multiphysics для ньютоновской жидкости тензор K выражается через тензор скоростей деформаций S и динамическую вязкость μ в следующем виде:

$$K = 2\mu S - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I; \quad (7)$$

Тензор скоростей деформаций S определяется как симметричная часть градиента скорости:

$$S = \frac{1}{2}[\nabla u + (\nabla u)^T]; \quad (8)$$

Второй член в уравнении (7), содержащий дивергенцию скорости $\nabla \cdot u$, вносит вклад объёмного расширения и становится значимым только для сжимаемых потоков. В рамках приближения несжимаемой жидкости ($\nabla \cdot u = 0$) тензор K упрощается до классического выражения для ньютоновской жидкости:

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T);$$

Уравнение Новье-Стокса будет иметь следующий вид после преобразования тензора вязких напряжений:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F;$$

Результаты исследования и их обсуждение

При расчёте благодаря модулю оптимизации в Comsol Multiphysics и анализу были выявлены оптимальные размеры конструкции, представленные в табл. 2.

Основные проблемы проектирования этого глушителя сводятся к двум моментам: оптимальному размещению сепараторов и подбору перфорированного листа в интерференционной камере. Расчёт показал, что сепараторы должны быть размещены с шагом 150 мм по вершине при углах раскрытия 60°, 50° и 40°. В качестве листа выбран перфолист Rv 5–8 как наиболее подходящий.

Табл.2. Основные размеры глушителя.

Параметры	Значение	Ед.изм.
Общая длина, L	2200	мм
Длина лопаток, L1	345	мм
Длина интерференционной камеры, L2	450	мм
Длина промежуточной камеры, L3	300	мм
Длина абсорбционной камеры, L4	550	мм
Длина перфорированной трубы, L5	340	мм
Диаметр условного прохода, Ду	500	мм
Диаметр обечайки, D	1200	мм

Источник: данные с результата расчета

Результатами исследования акустики и газодинамики служат графики потери передачи звуковой энергии (см. Рисунок 2), а также зависимость расхода газа и давления (см. Рисунок 3).



Рис. 2. График потери звукового давления глушителя в дБ (средний показатель 40,3 Дб).

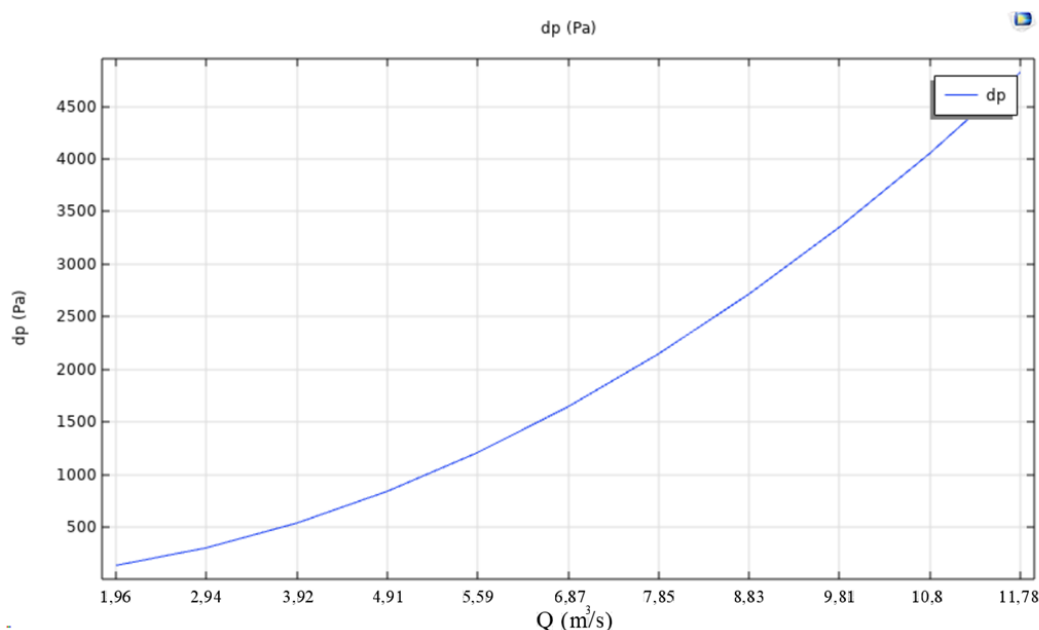


Рис. 3. График зависимости расхода газа и давления.

Стоимость материалов глушителя представлены в табл.3. Все конструкция изготавливается путем лазерной резки, гибки и сварки металла, что делает изготовление подобной конструкции доступным вариантом.

Табл.3. Сметная таблица материалов глушителя.

Материал	Кол-во (ед.изм)	Стоимость, руб
Лист г/к 2х1250х2500 Ст3ПС	7 лист	17500
Труба эл/св Ду500 Ст3ПС	0,4 метр	6 000
Плита базальтовая Техновент Стандарт 50х600х1200мм 034 пл.75-85кг/м³ (4,32м²/0,216м³ - 6 шт) термостойкая	2,5 упак	6 157
Базальтовой ткань типа ТБК-100	1 рулон	1 900
Перфорированный лист (перфолист Rv 5-8) толщиной 1,5 мм размер 1000х500	5 листов	17 500
Лист г/к 16х1250х2500 Ст3ПС	0,1	5 000
Итоговая стоимость глушителя с учетом амортизации 30%		70 275 руб

Выводы

В результате работы спроектирован интерференционный глушитель

для выхлопной системы ДГУ мощностью 1800 кВт, обеспечивающий снижение уровня шума в среднем на 40,3 дБ, что соответствует заданному требованию. Оптимизация конструкции позволила определить рациональные геометрические параметры: расстояние между сепараторами 150 мм с углами раскрытия 60°, 50° и 40°, а также подобрать перфолист Rv 5–8 для интерференционной камеры. Численное моделирование в COMSOL Multiphysics подтвердило акустическую эффективность устройства, а газодинамический расчёт показал приемлемые характеристики противодавления и расхода газа. Изготовление глушителя предусматривается из доступных материалов (сталь, базальтовая плита, термоткань) с использованием лазерной резки и сварки, что обеспечивает относительно невысокую себестоимость (около 70 тыс. руб. с учётом амортизации). Предложенная конструкция может быть рекомендована для практического применения на объектах с высокими требованиями к шумоподавлению.

Литература:

1. Chiu M-C, Chang Y-C. Optimization of pneumatic mufflers hybridized with metal sintered bronze porous material, expansion cone, and extended tube // Noise & Vibration Worldwide. – 2022. – Vol. 53, № 11. – P. 532-549.
2. В.А.Красильников. Введение в акустику – Издательство Московского университета, 1992.
3. Колотилов Н.Н. Алексеев С.П. Казаков А.М. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении издательство “Машиностроение” Москва 1970.