DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-604622

Оригинальное исследование

Расчетное исследование газодинамического подхода для снижения шума выпуска в двухтактном двигателе

А.А. Черноусов, Р.Д. Еникеев, Р.Э. Дадашов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Традиционный подход к проектированию глушителей шума выпуска во многом полагается на диссипацию в них энергии. При «газодинамическом» подходе поток выхлопных газов выравнивают, вводя в глушитель длинные каналы для разделения импульсов и смещения их по времени. Предполагается, что это обеспечит снижение шума без создания существенного противодавления.

Цель работы — оценка потенциала «газодинамического» подхода к уменьшению уровня шума выхлопа двухтактных двигателей внутреннего сгорания.

Методы. Исследование носит расчётно-теоретический характер. Объектом является двухтактный бензиновый двухцилиндровый двигатель РМЗ-551i, выпускная система которого содержит резонатор (обеспечивает газодинамический наддув) и собственно глушитель. Процессы в газовоздушном тракте двигателя рассчитаны по одномерной модели. Характеристикой шума выхлопа было эффективное звуковое давление в заданной точке из 2D расчёта упругих возмущений в окружающей среде. Вначале рассчитаны показатели двигателя и уровень звукового давления с серийным глушителем на полной мощности и частоте вращения, близкой к номинальной. Далее изменена структура глушителя: между двумя его камерами добавлен канал. Параметры такого глушителя оптимизированы, критерием был минимум пульсаций потока на выходе. Снижение шума выхлопа для глушителя, реализующего газодинамический подход, как и для серийного, оценено по уровням звукового давления в дБ. Рассчитаны показатели в широком диапазоне частот вращения вала, в частности — уровень звукового давления.

Результаты. По расчётным оценкам, оптимальная реализация газодинамического подхода в глушителе снижает шум выхлопа на 7 дБ при том что мощность двигателя уменьшается на 2,5%. Расчёт уровня звукового давления по внешней скоростной характеристике показал, что на частоте вращения, равной 3000 об/мин, звуковое давление на 8 дБ превышает минимум (99 дБ), полученный на частоте вращения в 5000 об/мин для оптимально «настроенного» глушителя. Высказано предположение, что газодинамический подход применим и к равномерному снижению шума в широком диапазоне частот вращения (при усложнении структуры глушителя шума выхлопа).

Заключение. Теоретически оценён глушитель с каналом подобранной длины, соединяющим две его камеры; база для сравнения — двухтактный двигатель РМЗ-551i с серийным глушителем. По результатам расчётов, в точке оптимума на скоростной характеристике шум выхлопа снижен на 7 дБ, причём мощность снизилась несущественно. Авторы отметили пригодность методологии для оперативных оценок и для автоматизированной расчётной оптимизации глушителей, использующих волновые эффекты, но также и ограничения моделей, которые требуют подтверждения или калибровки по экспериментальным данным. Отмечена нужда в разработанных специалистами прикладных моделях акустических эффектов и измерительных устройств для отечественных CAE-пакетов.

Ключевые слова: двухтактные двигатели; шум выхлопа; глушители; волновые эффекты; моделирование на ЭВМ; оптимизация.

Как цитировать:
Черноусов А.А., Еникеев Р.Д., Дадашов Р.Э. Расчётное исследование газодинамического подхода для снижения шума выпуска в двухтактном двигателе // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 2. С. 181–190. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-604622

Рукопись получена: 05.10.2023 **Рукопись одобрена:** 04.06.2024 **Опубликована online:** 04.06.2024

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-604622

Original Study Article

Computational study of the gas-dynamic approach for noise reduction in the two-stroke engine's exhaust system

Andrei A. Chernousov, Rustem D. Enikeev, Reshad E. Dadashov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The traditional approach to designing exhaust mufflers relies mainly on energy dissipation. In the gas-dynamic approach, the flow of exhaust gases is equalized by introducing long channels into the muffler to separate impulses and to shift them in time. It is assumed that this ensures noise reduction without generation of significant counterpressure.

AIM: Evaluation of the prospects of the gas-dynamic approach to reducing the noise level of the exhaust system of two-stroke internal combustion engines.

METHODS: The study has a computational and theoretical nature. The study object is the RMZ-551i two-stroke gasoline two-cylinder engine, which exhaust system includes a resonator (ensures gas-dynamic supercharging) and a muffler. The processes in the gas-air circuit of the piston engine were calculated using the 1D model. The noise characteristic was the effective sound pressure at a specified point in the environment, calculated using the 2D model of propagation of disturbances in elastic medium. Initially, the engine parameters and sound pressure level with the stock muffler at full load and close to nominal engine speed were calculated. Then, the structure of the stock muffler was modified by adding a channel between its two chambers. The parameters of the modified muffler were optimized based on the criterion of gas pulsations reduction at the outlet. The noise reduction of the muffler implementing the gas-dynamic approach was evaluated relatively to the stock muffler and expressed in terms of sound pressure levels in dB. The parameters and sound pressure were finally calculated over a wide range of engine speeds.

RESULTS: According to the computational estimation, the optimal implementation of the gas-dynamic approach in the muffler reduces exhaust noise by 7 dB, while engine power decreases by 2.5%. Calculation of the sound pressure level based on the full-load curve showed that at an engine speed of 3000 rpm, the calculated sound pressure exceeds the minimum (99 dB), obtained for the optimally tuned muffler at an engine speed of 5000 rpm, by 8 dB. It is suggested that the gas-dynamic approach with optimization is also applicable for uniform noise reduction over a wide range of engine speeds, with a more complicated design of the exhaust muffler.

CONCLUSION: Theoretical evaluation of the muffler with a tuned channel connecting its two chambers was carried out. The RMZ-551i two-stroke engine with a stock muffler is a basis for comparison. At the optimum point on the full load curve, the exhaust noise was reduced by 7 dB, while the calculated power decrease was insignificant. The authors note the suitability of the methodology for rapid assessments and automated computational optimization of mufflers that utilize wave effects. They also point out the limitations of the models used, which require validation or calibration based on the experimental data. The necessity in the development of applied models of acoustic effects and measuring devices for domestic CAE packages is pointed out as well.

Keywords: two-stroke engines; exhaust noise; mufflers; wave effects; computer modeling; optimization.

To cite this article:

Chernousov AA, Enikeev RD, Dadashov RE. Computational study of the gas-dynamic approach for noise reduction in the two-stroke engine's exhaust system. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2024;91(2):181–190. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-604622

Received: 05.10.2023 **Accepted:** 04.06.2024 **Published online:** 04.06.2024

moscow polytech

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2024

ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ

Поршневой ДВС — тепловой двигатель циклического действия. Интенсивные пульсации потока газов на выходе из газовоздушного тракта (ГВТ) создают шум, характеризующийся совершенно недопустимыми уровнями звукового давления, если не применять глушители [1]. Интенсивные волновые явления в ГВТ современных ДВС приводят к сильным пульсациям давления и др. параметров в потоке на выходе из «мощностной» части системы выпуска или впуска. Колебания давления и пульсации расхода особенно интенсивны при применении газодинамической настройки.

От глушителя шума выпуска требуется преобразовать поток с пульсациями в стационарное (в идеале) и с малой скоростью потока истечение газов в атмосферу.

Конструкция глушителей шума выпуска ДВС обычно содержит соединённые отверстиями и короткими каналами камеры. Демпфирование пульсаций параметров газа в таких глушителях сопряжено с диссипативными процессами при перетекании и взаимодействии с элементами звукопоглощающей набивки. Такой подход к созданию систем глушения шума пульсирующих потоков называется «диссипативным» [2].

В конструкцию глушителя может быть заложен и другой подход — «газодинамический» [2]. В проточной части таких глушителей камеры соединены ещё и относительно длинными каналами. Последние обеспечивают задержку прибытия волны давления в последнюю камеру глушителя «в противофазе» с возмущением от перетекания через отверстия и короткие каналы. Как результат, существенно ослабляются пульсации параметров в камере и скорости потока в выпускном патрубке. То есть, при данном подходе пульсации потока ослабляют, используя в основном волновые, а не диссипативные эффекты. Поэтому реализующий такой подход глушитель при сопоставимых габаритах, предположительно, можно сделать эффективнее, существенно не усложняя и не утяжеляя конструкцию.

Методы моделирования на ЭВМ шума впуска и выпуска ДВС традиционно опираются на одномерные модели, позволяющие учесть пульсации потока в сечениях ГВТ. Модели и методики для оперативной оценки уровней звукового давления и оптимизации конструкций глушителей разрабатывались и проходили проверку [3, 4]. Применяя такие методики и инструменты [5], оптимизировали и затем испытывали глушители шума выхлопа.

Далеко не все действительные источники и частоты спектра газодинамического шума ДВС учтёт методика, если в её основе не лежит детальная трёхмерная (3D) модель. Такая модель учитывает реальную геометрию и требует мелкоячеистой сетки и больших вычислительных мощностей. Исследователи углубляют методологию в этом направлении более двух десятилетий. Ранние работы основаны на расчёте по 1D модели пульсирующего течения в каналах ГВТ, сопряжённых с 3D расчётом течения в глушителе (с заданной более или менее реалистичной 3D геометрией; см., например, [6]). Расчётом течения в камерах и каналах глушителя с умеренно высокой детализацией в 3D выявляют, как минимум, крупномасштабные нестационарные структуры.

На этой основе можно детально рассчитать струйное нестационарное истечение газов в окружающую среду. Для адекватности расчёта необходимо выявить широкий интервал масштабов вихревых структур. В областях размером порядка расстояний, на которых располагают микрофон шумомера (измеряя спектр и эквивалентное звуковое давление), также удаётся детально рассчитать возмущение по уравнения акустики. Такие задачи решают сопряжённо с решением уравнений детальной 3D модели течения в струе используя высокоточные численные методы. В такой постановке исследуют шум выхлопа, применяя и коммерческие CFD-решатели, и свои наработки по моделям и методам аэроакустики [7]. Указанные разработки могут быть применены для калибровки быстросчётных моделей акустических полей в окружающей среде, которые позволяют оперативно оценивать спектры и интегральные показатели шума двигателей и других систем в CAE-пакетах [8–10], реализующих одномерные модели процессов в двигателях, сопряжённые с моделями микрофонов и шумомеров.

В данном исследовании, с применением имеющихся моделей и методики, авторы оценили сравнительными расчётами предельные возможности глушителя «газодинамического» типа. Нелинейные процессы во всем ГВТ двухтактного двигателя с «настроенной» выпускной системой (содержащей резонатор и глушитель) рассчитывали по одномерной (1D) термогазодинамической модели. Уровень звукового давления, характеризующий шум, вызванный пульсирующим потоком на выходе из глушителя, оценивали по методике, включающей 2D численный расчёт возмущений в окружающей среде. Определили уровень шума и показатели двигателя с серийным глушителем на режиме полной мощности и частоте вращения, близкой к номинальной, далее исследовался глушитель с изменением в структуре. В 1D модель глушителя добавлен длинный канал, соединяющий две его камеры. Найдены оптимальные параметры глушителя такой конструкции. Затем расчётным путём оценены показатели двигателя и шум выпуска в широком диапазоне частот вращения двигателя.

Расчеты по примененной методологии позволят примерно оценивать эффективность схем глушителей, реализующих «газодинамический» подход, как это показано применительно к двухтактному двигателю с волновой настройкой выпускной системы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель расчётного исследования состояла в теоретической оценке пределов снижения уровня шума выпуска

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-604622

двухтактного форсированного двигателя при реализации в нем «газодинамического» подхода к уменьшению пульсаций потока газов на выходе из глушителя.

МЕТОДЫ

Исследованы возможности «газодинамического» подхода для уменьшения шума выпуска двухтактных двигателей внутреннего сгорания. Рассматриваемый подход состоит в использовании относительно длинного соединительного канала для обеспечения временной задержки прихода волны в последнюю из камер глушителя. Разделение импульсов и их временное смещение позволяют ослабить колебания параметров газа в последней камере, что приближает течение через короткий выхлопной патрубок к стационарному.

Исследование имело теоретический характер (вычислительный эксперимент). Численными расчётами по 1D модели термо- и газодинамических процессов в двухтактном поршневом двигателе и с применением специальной расчётной методики оценивался уровень звукового давления на выпуске. Для предельной оценки эффективности подхода выполнена расчётная оптимизация параметров соединительного канала и камер глушителя, нацеленная на минимальный шум выпуска с сохранением уровня мощности серийного двигателя.

В качестве объекта исследования взят двигатель РМЗ-551i производства концерна «Русская механика». Этот двухтактный двухцилиндровый двигатель имеет рабочий объем 553 см^3. Двигатель находит применение в различных гражданских областях, включая использование на снегоходах, аэросанях, аэролодках и парапланах. Образец двигателя имеется в распоряжении кафедры ДВС УУНиТ и исследовался на испытательном стенде. На рис. 1 показан общий вид двигателя. В табл. 1 — параметры двигателя, заявленные производителем.

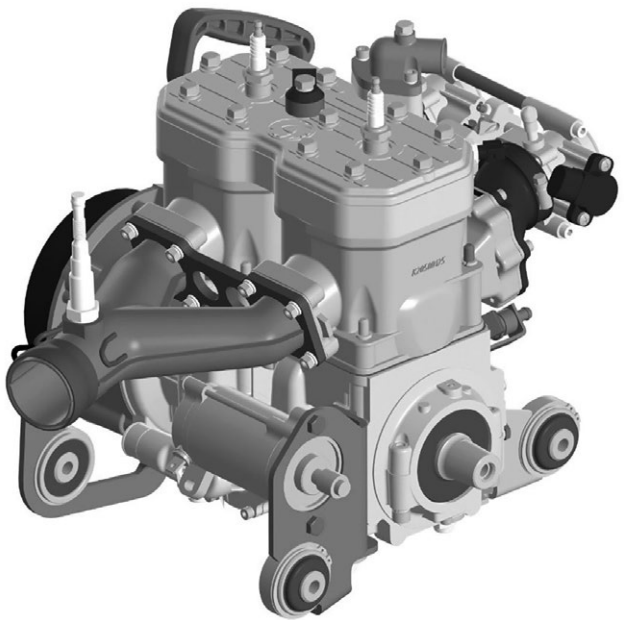

Рис. 1. Двигатель РМЗ-551i.
Fig. 1. The RMZ-551i engine.

Таблица 1. Краткая техническая характеристика
Table 1. The key technical specifications of the engine

Тип	2-тактный
Число цилиндров	2
Диаметр цилиндра, мм	76
Ход поршня, мм	61
Мощность, л. с.	65
Система топливоподачи	С инжектором
Система смазки	Раздельная
Система выпуска	С резонатором

Для моделирования двигателя был применён созданный в УУНиТ [11] программный пакет *ALLBEA* выпуска 2023 г., включающий программы *ALLBEA OPTIM* [12] и *ALLBEA NOISE*.

В графической среде пакета собрана структурная схема 1D модели процессов в газовоздушном тракте (ГВТ) двигателя (рис. 2).

1D 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»), взятых из библиотеки моделей, реализованных в *ALLBEA*.

Трёхмерная (3D) геометрическая модель двигателя, включающая все компоненты ГВТ, предоставлена концерном «Русская Механика». Геометрические модели были изучены чтобы адекватно представить в 1D модели структуру ГВТ (см. рис. 2), геометрию компонентов и законы открытия выпускных и продувочных окон. Основываясь на 3D моделях деталей проточной части, были созданы расчётные области для 3D расчётов расходных характеристик всех групп окон и продувочной характеристики рабочей камеры при газообмене. Расчёты выполнены в *CFD*-пакете по отработанной методике, результаты обработаны и подставлены в 1D модель в виде таблично заданных характеристик.

Выпускная система двигателя, включающая выпускные патрубки, тройник, резонатор и глушитель, показана на рис. 3.

Резонатор в двигателе используется для повышения мощности и экономичности за счёт волновых эффектов в потоке газов. Он наиболее эффективен на частоте вращения «настройки», на которой значительная часть топливовоздушной смеси, выходящей из рабочих камер в систему выпуска, возвращается обратно в камеру до закрытия выпускных окон. Резонатор данного двигателя имеет сложную трёхмерную форму (см. рис. 3).

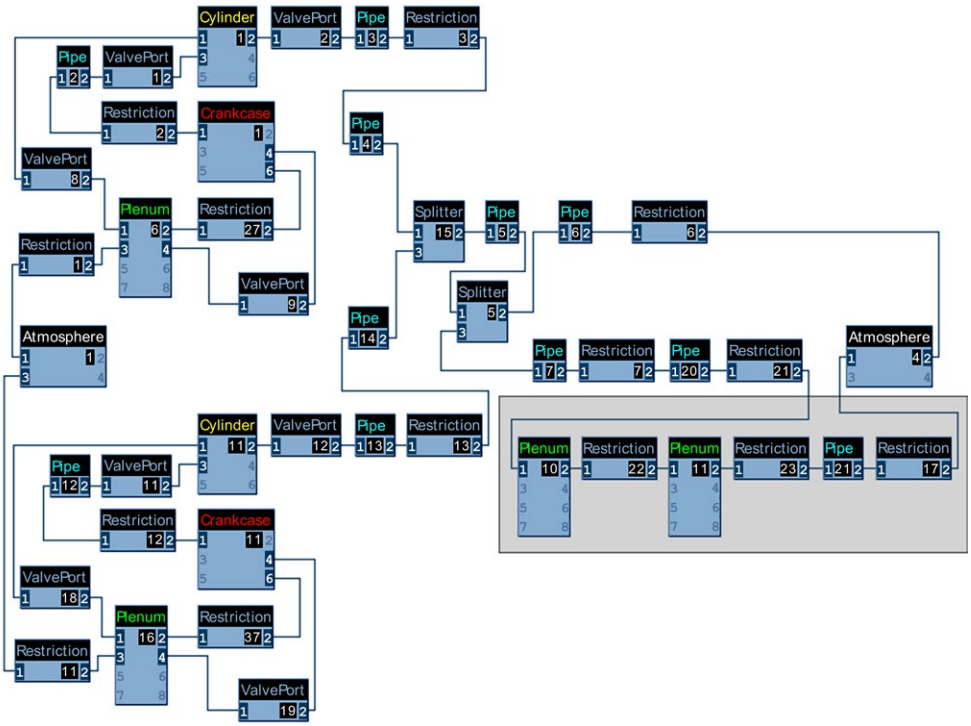

Рис. 2. Структура 1D модели двигателя в ALLBEA.
Fig. 2. The structure of the 1D model of the engine in the ALLBEA.

Он был упрощённо представлен в 1D модели в виде набора профильных каналов (см. рис. 2; выделены элементы серийного глушителя). Профиль резонатора в 1D включал прямой и обратный конические участки, а также центральный внутренний канал в обратном коническом участке.

Волновые процессы в резонаторе и вызванные ими колебания потока на входе в глушитель весьма интенсивны. Для сглаживания пульсаций в глушителях используют перфорированные перегородки и сетки. Прохождение газом этих препятствий снижает уровень шума, но создаёт противодавление. В данном двигателе глушитель состоит из двух камер разного объёма, которые соединены отверстиями в общей перегородке. Схема глушителя показана на рис. 4.

На рис. 2 контуром обведены элементы 1D модели данного (серийного) глушителя.

После создания 1D модели двигателя и ввода всех необходимых исходных данных, модель была проверена на точность и показала удовлетворительное соответствие расчётных и измеренных на стенде показателей на ряде рабочих режимов. Задача точной настройки модели не ставилась, так как модель предназначалась для сравнительных расчётов эффективности глушителей шума выпуска — серийного и оптимизированного.

Шум, производимый потоком из выпускной системы, оценивали эффективным звуковым давлением, определённым как среднеквадратическое отклонение давления от давления p_a в невозмущённой среде (в Па):

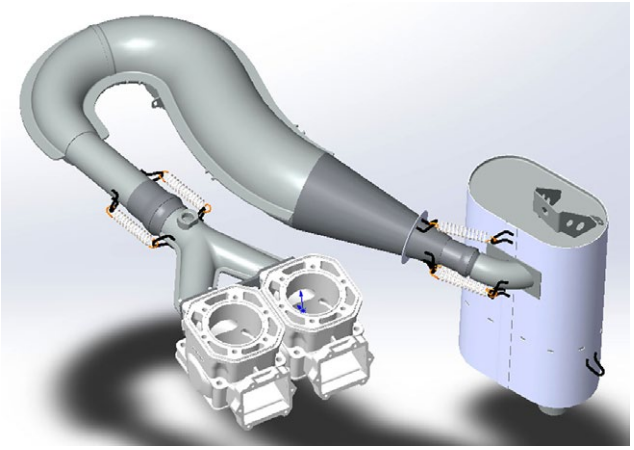

Рис. 3. 3D модель системы выпуска.
Fig. 3. The 3D model of the exhaust system.

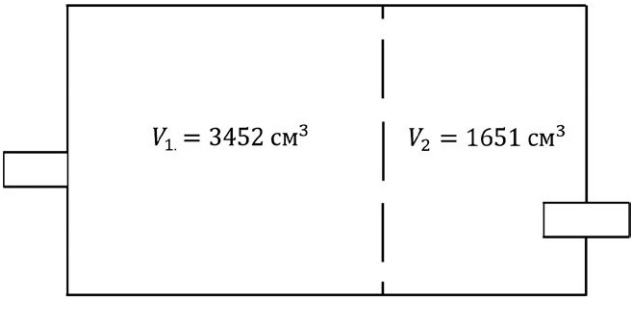

Рис. 4. Схема серийного глушителя.
Fig. 4. The scheme of the stock muffler.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-604622

$$p_{эф} = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_{t_0}^{t_0+\delta}[p(t)-p_a]^2} \approx \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(p_i - p_a)^2},$$

где N — число узловых значений давлений, взятых с постоянным шагом в интервале времени τ (равном или кратном периоду пульсаций).

В акустике уровень звукового давления выражают относительно характерного (опорного) значения (в дБ). Принято выражение с десятичным логарифмом этого отношения [2, 13]:

$$L = 20\lg(p_{эф} / p_0),$$

где $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — опорное значение.

Было принято расположение точки на расстоянии 500 мм от среза выпускного патрубка и под углом 45 градусов к его оси [14].

Так как модель микрофона не встроена в *ALLBEA*, применена специальная методика расчёта уровня звукового давления L в точке окружающей среды на основе данных о пульсирующем потоке на выходе из глушителя (из 1D расчёта). Методика была разработана на кафедре двигателей внутреннего сгорания УГАТУ и применялась для проектирования выпускных систем, оценки и оптимизации глушителей (см., например, [3]).

Для расчётов по этой методике применена программа *ALLBEA NOISE*. Программа рассчитывает возмущения в окружающей среде по 2D осесимметричной модели. Обработка численных данных даёт оценку уровня звукового давления L в точке.

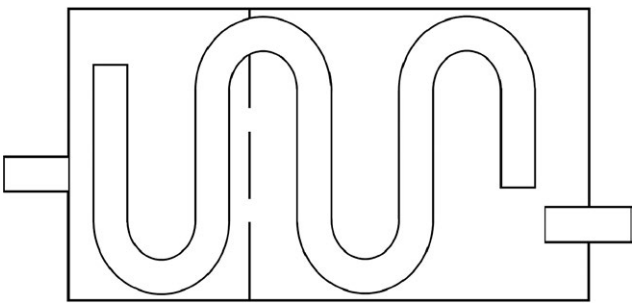

Рис. 5. Схема глушителя с длинным соединительным каналом.
Fig. 5. The scheme of the modified muffler with the extended connecting channel.

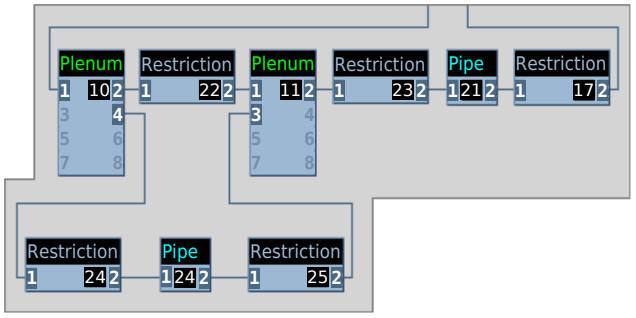

Рис. 6. Подмодель глушителя с каналом, соединяющим две камеры.
Fig. 6. The 1D submodel of the muffler with the channel connecting two chambers.

Вначале выполнен расчёт показателей и уровня звукового давления L на выпуске двигателя с серийным глушителем. Также выполнен ряд расчётов, в которых изучено влияние относительно объёма первой камеры глушителя, проходных сечений отверстий и замены их части коротким каналом на уровень шума выпуска и на мощность двигателя. Расчётами выявлена бесперспективность оптимизации параметров серийного глушителя; результаты этих расчётов здесь не приведены.

Затем принята изменённая схема, с добавлением длинного соединительного канала между камерами глушителя (рис. 5), реализующая газодинамический подход к снижению пульсаций потока. Канал вписывается в общий объем и размеры глушителя. Элементы 1D модели изменённого глушителя показаны на рис. 6.

Основные размеры $L_т$ и $D_т$ канала (элемент *Pipe* № 24 на рис. 6) сделаны оптимизируемыми параметрами, как и диаметр $D_{отв}$ каждого из 2 отверстий, оставленных в перегородке между камерами. Суммарный объем двух камер глушителя V был оставлен равным 5103 см^3, что соответствует объёму серийно выпускаемого глушителя. Объем канала (с учётом толщины его стенок в 0,8 мм) в 1D модели вычитался из объёмов камер пропорционально их исходным значениям, для которых $V_1 + V_2 = V$. Исходный объем V_1 первой по потоку газов камеры глушителя также подбирался.

Задача оптимизации связана с поиском максимума целевой функции (ЦФ), определённой как

$$f(L_т, D_т, D_{отв}, V_1) = (\Delta u_{ср.кв})^{-1},$$

где $_{ср\ кв}$ — среднеквадратичное отклонение скорости потока газов на срезе выходного патрубка глушителя от средней скорости потока на этом срезе:

$$\Delta u_{ср.кв} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(u_i - u_{ср})^2},$$

$$u_{ср} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} u_i .$$

ЦФ, обратно пропорциональная $\Delta u_{ср.кв}$, служила критерием оптимальности (вместо L) из-за отсутствия в *ALLBEA* адекватной модели микрофона.

Кроме ЦФ, учитывалось ограничение: расчётная мощность двигателя не должна быть более чем на 3% ниже расчётной мощности с серийным глушителем (41,09 кВт). В расчёте ЦФ для варианта, нарушившем ограничение, алгоритму оптимизации вместо значения ЦФ передавалось «штрафное» значение (признак недопустимого варианта).

Таким образом, были подобраны параметры глушителя с наименьшими, согласно ЦФ, пульсациями скорости

на выходе в атмосферу, но при этом без существенной потери мощности двигателя. Описанная оптимизационная задача была решена для двигателя на режиме полной мощности при частоте вращения вала n = 5000 об/мин. Задача оптимизации заключается в определении таких значений переменных, которые приводят к максимальному снижению уровня шума при минимальных изменениях конструкции глушителя и мощности на указанной частоте.

Оптимизационный расчёт был автоматизирован с применением программы *ALLBEA OPTIM* [12]. Программа использует генетический алгоритм поиска глобального максимума ЦФ с ограничениями. Программу настраивают на конкретную задачу оптимизации задавая параметры алгоритма и подключая внешний программный модуль на языке C или C++. Модуль при каждом вызове для вычисления ЦФ принимает текущие значения оптимизируемых параметров, подставляет их в расчёт процесса и по результатам вычисляет и возвращает значение ЦФ или штрафное значение. В данной работе для 1D расчёта процесса в ГВТ двигателя, включая глушитель, модуль вызывал расчётную программу — солвер пакета *ALLBEA*.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчётами проведена оценка предельного эффекта относительного изменения объёма камер глушителя и добавления соединительного канала между ними. По описанной методологии были рассчитаны показатели двигателя и уровень шума при использовании серийного глушителя. Затем была модифицирована конструкция глушителя путём введения «настроенного» соединительного канала и выполнена оптимизации основных размеров глушителя изменённой схемы. Для найденного оптимального варианта глушителя были рассчитаны показатели работы двигателя и звуковое давление на выпуске в диапазоне частот вращения коленчатого вала. Проведён анализ полученных данных.

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И УРОВНЯ ШУМА С СЕРИЙНЫМ ГЛУШИТЕЛЕМ

Для серийного глушителя (см. рис. 2–4) расчётное значение уровня звукового давления L на выпуске составило 105,9 дБ на режиме полной мощности и n = 5000 об/мин. Расчётное значение эффективной мощности двигателя: 41,09 кВт.

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ГЛУШИТЕЛЯ

Выполнена расчётная оптимизация глушителя с «настроенным» каналом, сообщающим две камеры параллельно отверстиям в перегородке (см. рис. 5 и 6). Найденному максимуму ЦФ соответствует минимум $\Delta u_{\text{ср.кв}}$ = 1,812 м/с при следующих значениях параметров глушителя: $L_{\text{т}}$ = 1810 мм, $D_{\text{т}}$ = 31,0 мм, $D_{\text{отв}}$ = 20,5 мм, V_1 = 1786 см^3.

Расчётные зависимости скорости потока и температуры выхлопных газов на выходе из серийного и из оптимизированного глушителя на рис. 7 приведены для сравнения в виде графиков от угла поворота вала в пределах одного периода пульсаций (½ оборота: двигатель двухцилиндровый). Расчётная эффективная мощность двигателя: 40,06 кВт при n = 5000 об/мин.

При найденных оптимальных параметрах глушителя рассчитаны показатели двигателя на ряде частот вращения при полной мощности (т.е., по внешней скоростной характеристике). В рассчитанных режимных точках по описанной выше методике определены уровни звукового давления L. Графики эффективной мощности и L показаны на рис. 8.

ОБСУЖДЕНИЕ

Расчётные оценки показали возможность уменьшить примерно на 7 дБ шум на выпуске двигателя РМЗ-551i добавив «настроенный» канал между двумя камерами глушителя. Оптимизированный глушитель компонуется в габаритах серийного глушителя и уменьшает расчётную эффективную мощность двигателя лишь на 2,5% (для той же частоты вращения, равной 5000 об/мин).

Следует отметить, что уже на частоте 3000 об/мин расчётный уровень звукового давления примерно на 8 дБ превышает минимум, т. е. газодинамическая настройка перестаёт оказывать эффект. Это ожидаемый результат, аналогичный снижению эффекта волновой настройки впускных и выпускных каналов основной (мощностной) части газовоздушного тракта.

За рамками настоящего исследования остались усложнённые структурные схемы глушителя (например, с двумя параллельными соединительными каналами разной длины). Структуру и параметры таких глушителей можно оптимизировать и для равномерного снижения шума выпуска в широком интервале частот вращения вала.

Ограничения методики и инструментов могут существенно повлиять на результаты, т. к. не вполне адекватно учтены некоторые физические процессы, происходящие внутри глушителя и в истекающей струе. Так, пульсации потока на срезе выпускного патрубка рассчитывались по глобально одномерной модели, где камеры глушителя были представлены «нульмерными» моделями ёмкостей, которые «отфильтровывают» высокочастотную составляющую пульсаций. Для расчёта звукового давления применена методика на основе расчёта возмущений в среде, производимых пульсациями потока на срезе глушителя. Однако численный расчёт возмущений по 2D модели движения воздуха как невязкой упругой среды не передаёт эффектов вихреобразования в турбулентной струе. По этим причинам расчётная оценка резервов газодинамического подхода к созданию

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-604622

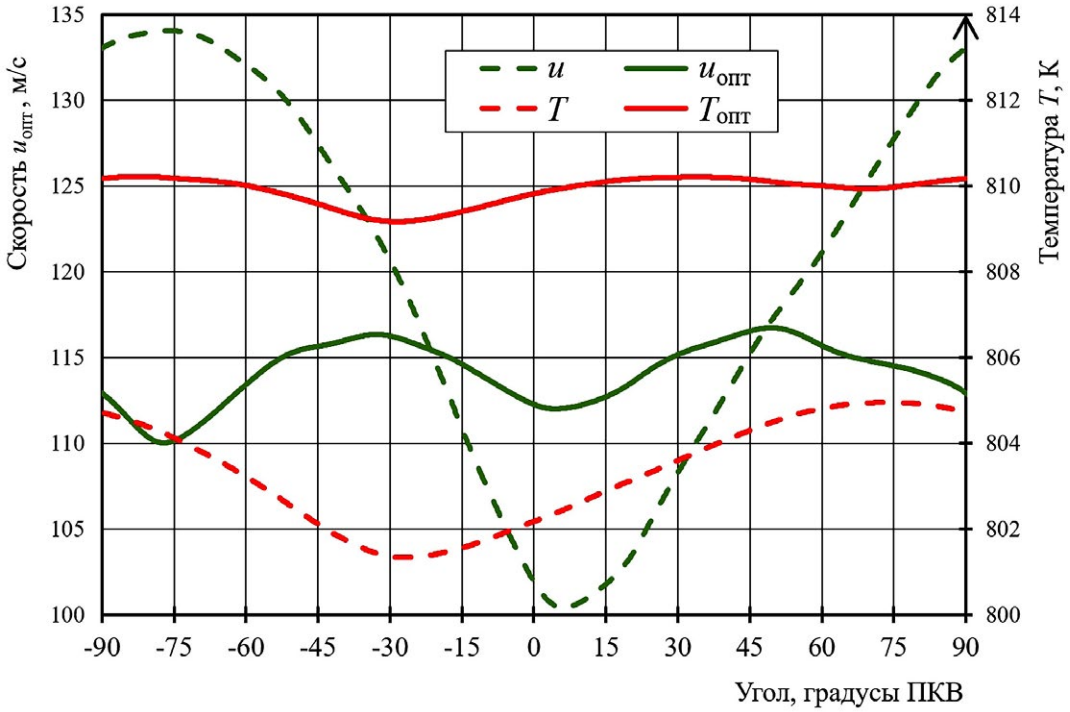

Рис. 7. Величины на срезе серийного (- - -) и оптимизированного (——) глушителя.
Fig. 7. Values at the outlet of the stock (- - -) and the optimized (——) muffler.

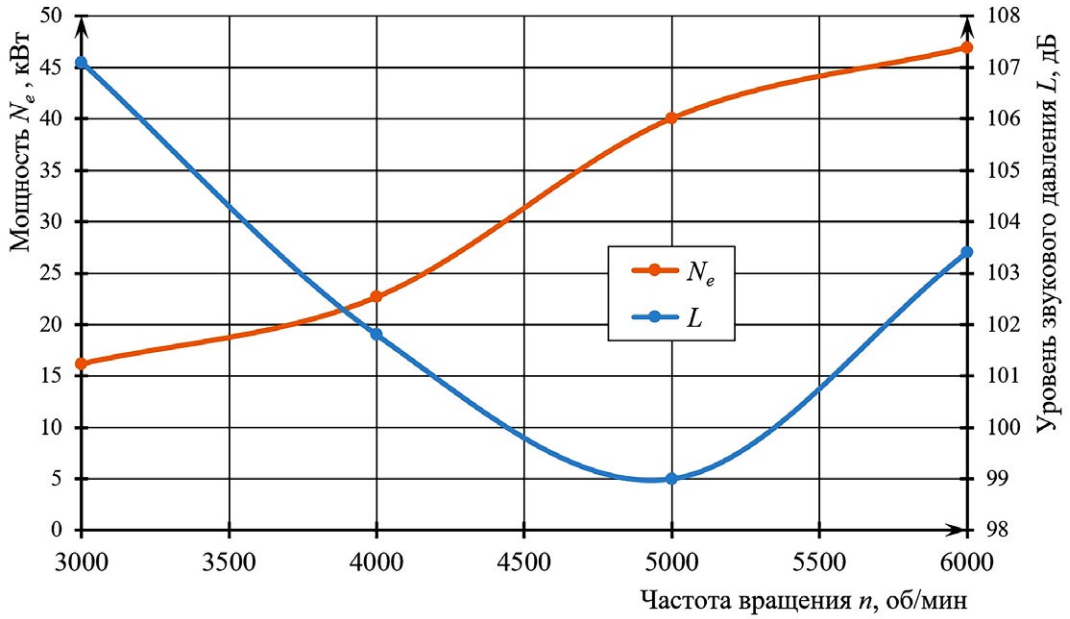

Рис. 8. Расчётные показатели для двигателя с оптимизированным глушителем.
Fig. 8. Calculated characteristic curves for the engine with the optimized muffler.

глушителей шума выпуска достаточно ориентировочна даже для случая сравнительных расчётов, результаты которых выражены в относительных величинах (в дБ).

Таким образом, необходимы дополнительные экспериментальные исследования для подтверждения получаемых результатов или же для «настройки» применяемых моделей. Перспективнее комплексно совершенствовать модели акустических эффектов и измерительных приборов для прикладного ПО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически оценена эффективность глушителя с «настроенным» длинным каналом между камерами

на примере двухтактного двигателя РМЗ-551i. Результаты численных расчётов, основанных на одномерной модели процесса и методике расчёта в 2D возмущений в окружающей среде, показали возможность снижения шума выпуска на 7 дБ по сравнению с серийным двухкамерным глушителем. Расчётная мощность двигателя снизилась несущественно: на 2,5%.

Методика и инструменты накладывают ограничения, которые могут заметно влиять на результаты. Поэтому модели и методика требуют дополнительных экспериментальных исследований для подтверждения (и теоретических — для уточнения). Тем не менее, применённая методика и инструменты могут быть рекомендованы для оперативных оценок и расчётной оптимизации глушителей, использующих волновые эффекты. Имеет смысл автоматизировать оптимизацию многокамерных глушителей по нужным критериям с применением 1D моделей процессов в газовоздушных трактах двигателей.

Требуется совершенствовать программные средства в ряде аспектов, чтобы существенно повысить адекватность расчётных оценок акустических показателей ДВС. Разработка прикладных моделей акустических эффектов и измерительных устройств может быть выполнена специалистами в области вычислительной и технической акустики. Необходимо ликвидировать отставание математического обеспечения отечественных CAE-пакетов в этой области.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.А. Черноусов — сбор и анализ литературных источников, написание и редактирование текста статьи; Р.Д. Еникеев — постановка задачи, экспертная оценка, утверждение финальной версии; Р.Э. Дадашов — проведение расчётов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.A. Chernousov — search and analysis of literary sources, writing and editing the text of the manuscript; R.D. Enikeev — task formulation, expert opinion and approval the final version; R.E. Dadashov — performing computer simulations. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignments № FEUE-2023-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балишанская Л.Г., Дроздова Л.Ф., Иванов Н.И. Техническая акустика транспортных машин. Санкт-Петербург: Политехника, 1992. EDN: TQOGNB

2. Рудой Б.П., Вахитов Ю.Р. Снижение газодинамического шума циклических и импульсных энергоустановок. Уфа: УГАТУ, 2008.

3. Вахитов Ю.Р., Загайко С.А. Приближенный метод расчёта шума выпуска ДВС // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. Т. 4, № 1. С. 11–14. doi: 10.17816/2074-0530-69518

4. Вахитов Ю.Р., Загайко С.А. Приближенный метод расчёта шума впуска ДВС // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 6, № 2. С. 61–64. doi: 10.17816/2074-0530-68429

5. Rudoy B.P., Vakhitov Y.R., Enikeev R.D. Improving engine performance and noise level using the ALBEA simulation technique // Proc. Inst. Mech. Eng. Part D: J. Autom. Eng. 2004. Vol. 218, No.12. P. 1447–1453. doi: 10.1243/0954407042707687

6. Sakurai M. Relation Between Exhaust Pulsating Flow and Radiation Noise: Development of Exhaust Radiation Noise Simulation Technology // SAE Tech. Paper Series. № 2004-01-0399. 12 p. doi: 10.4271/2004-01-0399

7. Mann A., Kim M., Neuhierl B., Perot F. et al. Exhaust and Muffler Aeroacoustics Predictions using Lattice Boltzmann Method // SAE Int. J. Passeng. Cars — Mech. Syst. 2015. Vol. 8, No.3. P. 1009–1017. doi: 10.4271/2015-01-2314

8. GT-POWER Gamma Technologies [Internet] [дата обращения: 03.10.2023]. Режим доступа: https://www.gtisoft.com/gt-power/

9. WAVE | Products | Realis Simulation [Internet]. [дата обращения: 03.10.2023]. Режим доступа: https://www.realis-simulation.com/products/wave/

10. AVL iceSUITE [Internet] [дата обращения: 03.10.2023]. Режим доступа: https://www.avl.com/avl-icesuite/

11. Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Проектирование и реализация пакета прикладных программ для анализа и синтеза сложных технических объектов // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 5. С. 60–68.

12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ РФ № 2021666333/ 13.10.2021. Бюл. № 10. Черноусов А.А. Программа ALLBEA OPTIM для оптимизации параметров по генетическому алгоритму. EDN: BODWWN

13. Miles R.N. Physical Approach to Engineering Acoustics. Springer, 2020.

14. ГОСТ Р 52231-2004. Внешний шум автомобилей в эксплуатации. Допустимые уровни и методы измерения. М.: Стандартинформ, 2004.

REFRENCES

1. Balishanskaya LG, Drozdova LF, Ivanov NI. *Technicheskaya akustika transportnykh machin.* Saint Petersburg: Polytekhnika, 1992. (In Russ). EDN: TQOGNB

2. Rudoy BP, Vakhitov YR. *Snizhenie gazodinamicheskogo shuma tsiklicheskikh i impulsnykh energoustanovok.* Ufa: USATU, 2008. (In Russ).

3. Vakhitov YR, Zagayko SA. Priblizhennyi metod rascheta shuma vypuska DVS. *Izvestiya MGTU "MAMI".* 2010;4(1):11–14. (In Russ). doi: 10.17816/2074-0530-69518

4. Vakhitov YR, Zagayko SA. Priblizhennyi metod rascheta shuma vpuska DVS. *Izvestiya MGTU "MAMI".* 2012;6(2):61–64. (In Russ). doi: 10.17816/2074-0530-68429

5. Rudoy BP, Vakhitov YR, Enikeev RD. Improving engine performance and noise level using the ALBEA simulation technique. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D: J. Autom. Eng.* 2004;218(12):1447–1453. doi: 10.1243/0954407042707687

6. Sakurai M. Relation Between Exhaust Pulsating Flow and Radiation Noise: Development of Exhaust Radiation Noise Simulation Technology. *SAE Tech. Paper Series.* No. 2004-01-0399. 12 p. doi: 10.4271/2004-01-0399

7. Mann A., Kim M., Neuhierl B., Perot F. et al. Exhaust and Muffler Aeroacoustics Predictions using Lattice Boltzmann Method. *SAE Int. J. Passeng. Cars — Mech. Syst.* 2015;8(3):1009–1017. doi: 10.4271/2015-01-2314

8. GT-POWER: Gamma Technologies [Internet] [accessed: 2023 October 03]. Available from: https://www.gtisoft.com/gt-power/

9. WAVE: Products: Realis Simulation [Internet] [accessed: 2023 October 03]. Available from: https://www.realis-simulation.com/products/wave/

10. Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.AVL iceSUITE [Internet] [accessed: 2023 October 03]. Available from: https://www.avl.com/avl-icesuite/.

11. Enikeev RD, Chernousov AA. Proektirovanie i realizacija paketa prikladnykh programm dlya analiza i sinteza slozhnykh tekhnicheskikh obyektov. *Vestnik UGATU.* 2012;16(5):60–68. (In Russ).

12. Certificate of state registration of computer program No. 2021666333/ 13.10.2021. Chernousov AA. Programma ALLBEA OPTIM dlya optimizatsii parametrov po geneticheskomu algoritmu. (In Russ). EDN: BODWWN

13. Miles RN. *Physical Approach to Engineering Acoustics.* Springer, 2020.

14. GOST R 52231-2004. Vneshniy shum avtomobiley v ekspluatatsii. Dopustimye urovni i metody izmereniya. Moscow: Standartinform, 2004. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

*** Черноусов Андрей Александрович,**
канд. техн. наук,
доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»;
адрес: Российская Федерация, 450008,
Уфа, ул. К. Маркса, д. 12;
ORCID: 0000-0001-5541-8082;
eLibrary SPIN: 2885-6338;
e-mail: andrei.chernousov@mail.ru

Еникеев Рустэм Далилович,
профессор, д-р техн. наук,
заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания»;
ORCID: 0009-0001-4683-1657;
eLibrary SPIN: 8556-3237;
e-mail: rust_en@mail.ru

Дадашов Решад Эльманович,
аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»;
ORCID: 0009-0006-1429-8436;
eLibrary SPIN: 1957-4650;
e-mail: reshad.dadashov85@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Andrei A. Chernousov,**
Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Internal Combustion Engines Department;
address: 12 K. Marx street, 450008 Ufa, Russian Federation;
ORCID: 0000-0001-5541-8082;
eLibrary SPIN: 2885-6338;
e-mail: andrei.chernousov@mail.ru

Rustem D. Enikeev,
Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Head of the Internal Combustion Engines Department;
ORCID: 0009-0001-4683-1657;
eLibrary SPIN: 8556-3237;
e-mail: rust_en@mail.ru

Reshad E. Dadashov,
Postgraduate at the Internal Combustion Engines Department;
ORCID: 0009-0006-1429-8436;
eLibrary SPIN: 1957-4650;
e-mail: reshad.dadashov85@mail.ru