

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАКТОРНЫХ ГЛУШИТЕЛЕЙ

Ю. Д. КАРПИЕВИЧ, А. Ф. БЕЗРУЧКО, И. И. БОНДАРЕНКО, В. Г. КОСТЕНИЧ

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220023, e-mail: kaftia@bsatu.by

В. А. БЕЛОУСОВ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: ktrauto@tut.by

(Поступила в редакцию 01.07.2026)

В статье описаны требования к глушителям шума двигателей сельскохозяйственных тракторов, представлена математическая модель расчёта шума выпуска тракторного дизеля. Важными характеристиками сельскохозяйственных тракторов являются внешний шум трактора и уровень шума на рабочем месте тракториста, величина которых должна удовлетворять требованиям системы стандартов безопасности труда. Также низкий шум трактора является его существенным конкурентным преимуществом, так как говорит о высоком качестве производства.

Одним из основных источников шума трактора является система выпуска отработавших газов двигателя внутреннего сгорания. Поэтому уровень шума, создаваемый ей в контрольных точках, должен быть на 10 дБА ниже, чем шум от всех других источников.

К конструкции тракторных глушителей предъявляется комплекс технических требований, который учитывает и специфические особенности тракторных выпускных систем. Поэтому в данной работе систематизированы требования к глушителям сельскохозяйственных тракторов, представлена структура задач по снижению уровня шума и способы решения некоторых из них.

Размеры и форма глушителя для тракторных двигателей выбираются исходя из требований по обзорности с рабочего места водителя и возможности применения некоторых навесных орудий, что приводит к ограничению габаритов и объёма глушителя. Противопожарные требования предписывают применение искроуловителей внутри глушителя и выпуск отработавших газов вверх над двигателем. Это ограничивает длину выпускного тракта, уменьшает объём глушителя и увеличивает сопротивление выпуску отработавших газов.

Предложена методика расчёта характеристики общего заглушения и его составляющих для низкочастотного шума и высокочастотного вихревого шума. На основании уравнений гидравлики разработана методика приближённого расчёта сопротивления выпускных систем.

Анализ полученных выражений и расчёт заглушения по экспериментальным значениям сопротивления и температуры показывают достаточно точное совпадение. Представленные математические зависимости позволяют производить предварительный расчёт характеристик глушителя и оптимизировать его конструкцию в процессе доработки.

Ключевые слова: трактор, двигатель внутреннего сгорания, шум, шум выпуска, глушитель, проектирование выпускных систем.

This article describes the requirements for agricultural tractor engine silencers and presents a mathematical model for calculating tractor diesel exhaust noise. Important characteristics of agricultural tractors include external tractor noise and the noise level at the driver's station, which must meet occupational safety standards. Low tractor noise is also a significant competitive advantage, as it indicates high production quality.

One of the main sources of tractor noise is the exhaust system of the internal combustion engine. Therefore, the noise level generated by it at control points must be 10 dBA lower than noise from all other sources.

Tractor muffler design is subject to a set of technical requirements that also take into account the specific features of tractor exhaust systems. Therefore, this paper systematizes the requirements for agricultural tractor mufflers, presents a structure of noise reduction problems, and approaches to addressing some of them.

The size and shape of mufflers for tractor engines are selected based on visibility requirements from the driver's seat and the ability to use certain attachments, which limits the muffler's dimensions and volume. Fire safety requirements require the use of spark arresters within the muffler and exhaust gas discharge upward, above the engine. This limits the length of the exhaust tract, reduces the muffler's volume, and increases exhaust resistance.

A method for calculating the overall muffler performance and its components for low-frequency and high-frequency vortex noise is proposed. Based on hydraulic equations, a method for approximate calculation of exhaust system resistance has been developed.

Analysis of the resulting expressions and muffler calculations based on experimental resistance and temperature values show a fairly accurate match. The presented mathematical relationships allow for preliminary calculations of muffler performance and optimization of its design during refinement.

Key words: tractor, internal combustion engine, noise, exhaust noise, muffler, exhaust system design.

Введение

Внешний шум трактора и уровень шума на рабочем месте тракториста относятся к основным характеристикам сельскохозяйственных тракторов. Производитель должен указывать эти характеристики в техническом паспорте, а их величина удовлетворять национальным стандартам стран, в кото-

рых техника эксплуатируется. Следует также отметить, что низкий шум является важным конкурентным преимуществом. Некоторые производители снижают уровни шума на 5–7 дБА больше требуемого стандартами. Косвенно, можно утверждать, что низкий шум – это высокое качество производства машин, степень влияния его источников на общий уровень. Одним из основных источников, определяющих внешний шум трактора и шум на рабочем месте тракториста, является система выпуска отработавших газов двигателя. Для исключения влияния выпускной системы на указанные регламентируемые характеристики трактора уровень шума, создаваемый ей в контрольных точках, должен быть на 10 дБА ниже, чем шум от всех других источников.

При разработке конструкции тракторных глушителей необходимо учитывать большой комплекс технических требований непосредственно к глушителям, а также специфические особенности конструкции тракторных выпускных систем. В отличие от традиционного подхода к проектированию выпускных систем двигателей внутреннего сгорания, где объём глушителя и его размеры определяются из условия требуемого глушения шума, при проектировании глушителей сельскохозяйственных тракторов существуют также ограничения по размерам и форме глушителя. Необходимо обеспечивать требования по обзорности с рабочего места и соблюдению требования пожарной безопасности, по которым глушитель должен располагаться над двигателем, а выхлоп должен быть направлен вверх. Есть также ограничения по габаритам, связанные с применением навесных сельскохозяйственных машин и оборудования.

Цель настоящей работы – систематизировать требования к проектируемым глушителям сельскохозяйственных тракторов, представить структуру задач и способы решения некоторых основных из них.

Основная часть

На рис. 1 показана структура решения общей задачи проектирования тракторных глушителей.

В отличие от традиционного подхода к выбору параметров глушителя для двигателей различного назначения, проектирование глушителя для тракторных двигателей начинают с определения его размеров и формы. Размеры и форму глушителя выбирают исходя из требований по обзорности с рабочего места [1]. При выборе габаритов глушителя кроме обеспечения требования по обзорности с места водителя необходимо учитывать и возможность применения некоторых навесных орудий, например вилы или передний ковш. Учёт выше указанных факторов приводит к ограничению габаритов и объёма глушителя. Анализ размеров выпускаемых систем производимых серийно сельскохозяйственных тракторов показывает, что требования по обзорности могут быть обеспечены при соотношении объёма глушителя к объёму двигателя в пределах 1,6–2. Для сравнения у автомобилей этот показатель находится в пределах 3–8.



Рис. 1. Структура решения общей задачи проектирования тракторных глушителей

Другой специфической особенностью выпускных систем двигателей сельскохозяйственных тракторов являются противопожарные требования [2], предписывающие применение устройства искроуловителей внутри глушителя и выпуск отработавших газов вверх над двигателем. Это ограничивает длину выпускного тракта, уменьшает объём глушителя, используемого под элементы шумоглушения, и увеличивает сопротивление выпуску отработавших газов.

Таким образом, разработка глушителя – это сложная научно-техническая задача, решение которой позволяет достигнуть требуемого уменьшения шума в широком диапазоне частот, искрогашения при

ограниченных размерах и ограниченной возможности выбора расположения и длины выпускной системы. При этом гидравлическое сопротивление выпускного тракта должно быть минимально возможным, поскольку его увеличение приводит к увеличению расхода топлива.

Основной эксплуатационной характеристикой глушителя является снижение шума выпуска двигателя до уровня, позволяющего выполнить требования нормативных документов по внешнему шуму трактора и шуму на рабочем месте тракториста. Ограниченные длина выпускного тракта и его объём не дают возможности обеспечить требуемое уменьшение пульсации потока газов и генерируемого на выходе шума в широком диапазоне частот только за счёт реактивных элементов – набора расширительных и резонансных камер. Реактивные элементы шумоглушения просты по конструкции и имеют низкое сопротивление. Однако глушение низкочастотных составляющих реактивными элементами практически неосуществимо, так как для этого требуются большие размеры камер и глушителя в целом. Для малогабаритных глушителей применим, главным образом, метод активного глушения путем установки последовательных гасителей колебаний, лабиринтов, перфорированных перегородок без использования дорогостоящих и, как правило, недолговечных звукопоглощающих материалов. Снижение шума достигается за счёт снижения пульсации скорости потока при сохранении средней скорости потока, а акустическая эффективность находится в прямой связи с аэродинамическим сопротивлением. При разработке схемы глушителя необходимо учитывать, что эффективность глушения зависит как от величины сопротивления, так и от метода его достижения. В некоторых случаях сопротивление, снижая низкочастотный шум, генерирует шум на других частотах из-за возникновения интенсивных вихревых потоков. Интенсивность этого шума пропорциональна скорости потока в данном месте.

При проектировании глушителя важную роль играет организация потока газа для увеличения его пути движения. Увеличивающиеся при этом площадь и время контакта потока с элементами конструкции, а также возникающие различные виды трения и теплообмена способствуют уменьшению скорости пульсаций и шума во всем диапазоне частот. Организация вращательного движения потока газа даёт возможность инерционного отделения раскаленных частиц нагара – искрогашения. Рациональная организация движения потока газа при активном способе глушения шума даёт возможность получить высокие заглушающие свойства в широком диапазоне частот при ограниченном объёме и приемлемом сопротивлении.

Приближённый расчёт сопротивления глушителя может быть выполнен на основе уравнений гидравлики, а характеристики заглушения по предлагаемому уравнению:

$$\Delta L = \Delta L_H + \Delta L_R + \Delta L_T, \text{ дБА}, \quad (1)$$

где ΔL_H , ΔL_R , ΔL_T – глушение, обеспечиваемое соответственно активным, реактивным сопротивлениями и теплообменом в глушителе, дБА.

Расчёт составляющих и общего глушения целесообразно вести для низкочастотного шума, обусловленного пульсациями газа при открытии выпускных клапанов, и высокочастотного вихревого шума. Расчёт составляющих общего глушения низкочастотного шума при проектировании выполняется по формулам:

$$\Delta L_H = 20 \lg \frac{\Sigma H}{H_{\text{тр}}}, \quad \Delta L_R = 0, \quad \Delta L_T = 20 \lg \frac{T_1}{T_2}, \quad (2)$$

где ΣH – суммарное гидравлическое сопротивление глушителя, Па; $H_{\text{тр}}$ – сопротивление равновеликой по длине глушителя трубы, Па; T_1 и T_2 – температура отработавших газов на выходе равновеликой по длине трубы и глушителя, К.

Используя известные гидравлические зависимости [3], можно рассчитать сопротивление выпускных систем:

$$\text{с глушителем} \quad \Sigma H = \xi_{\Sigma} \frac{\gamma u^2}{2}; \quad (3)$$

$$\text{без глушителя (равновеликая труба)} \quad H_{\text{тр}} = \frac{\lambda S_0}{4F_0} \frac{\gamma u^2}{2}. \quad (4)$$

Здесь ξ_{Σ} – суммарный коэффициент сопротивления выпускной системы с глушителем; γ – плотность отработавших газов, кг/м³; u – средняя скорость потока газов, м/с; λ – коэффициент сопротивления трения относительно длины трубы; S_0 – площадь поверхности трения, м²; F_0 – площадь поперечного сечения трубы, м².

Средняя скорость потока газов рассчитывается по формуле [4, 5]:

$$u = \frac{\mu T V_h \zeta_0}{F_0 T_0} \left(\frac{ni}{60\tau} \right), \quad (5)$$

где ζ_0 и μ – соответственно коэффициенты наполнения цилиндров и молекулярного изменения рабочей смеси; V_h – рабочий объём цилиндра двигателя, м³; T и T_0 – температура отработавших газов и свежего заряда, К; n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹; i – число цилиндров; τ – коэффициент тактности.

Поскольку уменьшение переменной составляющей скорости пульсирующего потока активным сопротивлением приводит к уменьшению вихревого шума по закону шестой степени $p \sim u^6$, а гидравлическое сопротивление пропорционально квадрату скорости потока $H \sim u^2$, общее глушение низкочастотного и высокочастотного шума выпуска отработавших газов можно определить из выражений:

$$\Delta L_{\text{нч}} = 20 \left(\lg \frac{\sum H}{H_{\text{тр}}} + \lg \frac{T_1}{T_2} \right); \quad (6)$$

$$\Delta L_{\text{вч}} = 30 \lg \frac{\sum H}{H_{\text{тр}}} + 20 \lg \frac{T_1}{T_2}. \quad (7)$$

Анализ выражений (6) и (7) и расчёт заглушения по значениям сопротивления и температуры, полученным экспериментально, показывает достаточно точное совпадение. А также указывает, что основным компонентом шумоглушения является сопротивление. В то же время, сопротивление выпуску существенно влияет на экономичность двигателя. При $\sum H/H_{\text{тр}} = 3,8\text{--}3,9$ удельный расход топлива в сравнении с $\sum H/H_{\text{тр}} = 1$ возрастает до 2 г/кВт·ч. Исходя из выше сказанного, глушитель должен проектироваться с оптимальной заглушающей характеристикой. Чрезмерное улучшение заглушающей характеристики не приведет к снижению шума на рабочем месте и внешнего шума, а повышенное сопротивление ухудшит показатель расхода топлива. Это особенно актуально на тракторах, оборудованных катализаторами и сажевыми фильтрами. Указанные компоненты, с точки зрения акустики, являются эффективными активными глушителями. Поэтому глушитель в данном случае нужно оптимизировать по показателям требуемого заглушения и сопротивления.

Заключение

1. Разработка конструкции тракторного глушителя – это техническая задача по определению его основных характеристик: размеров, оптимального заглушения, допустимого гидравлического сопротивления и искрогашения.

2. Применение реактивных глушителей на тракторах не позволит достичь требуемых норм шума системы выпуска, для малогабаритных тракторных глушителей необходимо использовать активный способ шумоглушения.

3. Приведённые математические зависимости позволяют производить предварительный расчёт характеристик глушителя и оптимизировать его конструкцию в процессе доработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система стандартов безопасности труда. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности: ГОСТ 12.2.019–2015. – Введ. 01.07.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 14 с.
2. Система стандартов безопасности труда. Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности: ГОСТ 12.2.002–2020. – Взамен ГОСТ 12.2.002–91; введ. 01.11.2021. – Минск: Госстандарт, 2021. – 54 с.
3. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
4. Разумовский, М. А. Борьба с шумом на тракторах / М. А. Разумовский. – Минск: Наука и техника, 1973. – 208 с.
5. Разумовский, М. А. Прогнозирование шума поршневых двигателей / М. А. Разумовский. – Минск: Высшая школа, 1981. – 39 с.