

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫПУСКНЫХ СИСТЕМ ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### Содержание

*В статье описаны: методики проектирования систем выпуска отработавших газов, расчета шумовых характеристик глушителя, оптимизации технических характеристик выпускной системы*

**Ключевые слова:** трактор, двигатель, шум, методы ограничения шумов, шумовая характеристика глушителя, оптимизация параметров глушителя

## DESIGN OF EXHAUST SYSTEMS OF TRACTOR ENGINES

### Summary

*The article describes: design methods for exhaust systems, calculation of the noise characteristics of a silencer, optimization of the technical characteristics of the exhaust system.*

**Key words:** tractor, noise, methods of noise reduction, the noise exhaust, design of exhaust systems

### 1. Введение

Производители тракторов создают линейки тракторов с двигателями в разной мощности (разного тягового класса). Комплектации двигателей, даже одинаковой мощности, существенно отличается. Они оборудуются различными системами охлаждения, подачи топлива и воздуха, могут устанавливаться дополнительные системы очистки выхлопных газов. Эти конструктивные особенности существенно влияют на шумовые характеристики и должны учитываться при проектировании глушителей. В противном случае, на некоторых моделях, шум отдельных агрегатов и систем будет чрезмерно занижен и ухудшены другие характеристики. Например, по расходу топлива или стоимости. И наоборот, на другой модели того же класса шум будет превышать нормы.

Цель настоящей работы - определить и систематизировать особенности проектирования тракторов с низким уровнем шума без ухудшения других технических характеристик трактора.

### 2. Основная часть

Внешний шум трактора и уровень шума на рабочем месте тракториста относятся к основным характеристикам. Производитель должен указывать эти характеристики в техническом паспорте, а их величина удовлетворять национальным стандартам стран, в которых техника эксплуатируется. В СНГ установлены нормы на рабочем месте 80 дБА и внешний шум 85 дБА для тракторов с эксплуатационной массой не превышающей 1500 кг, 89 дБА с эксплуатационной массой превышающей 1500 кг. В некоторых странах эти нормы значительно жестче: 75 дБА на рабочем месте и 80 дБА внешний шум. 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.

Для эффективного снижения шума трактора важно определить степень влияния его источников на общий уровень. У большинства моделей тракторов степень влияния на внешний шум агрегатов и систем можно расположить в следующей последовательности по мере снижения: выпускная система, двигатель, вентилятор системы охлаждения, трансмиссия, система впуска двигателя. В такой же последовательности нужно проводить мероприятия по снижению общего шума [2, 4, 5]. Например, снижение шума впуска, без предварительного снижения шума других источников, не приведет к снижению внешнего шума и шума в кабине. Если уровень шума источника ниже общего уровня на 10 дБА и более, то снижение его шума не повлияет на общий уровень шума. Оптимизация характеристик по шуму это компромисс. Улучшение акустических характеристик, как правило, приводит к ухудшению других характеристик системы (цена, расход топлива, мощность и т.д.).

Специфической особенностью выпускных систем двигателей сельскохозяйственных тракторов является более высокие требования по пожаробезопасности, поэтому в глушитель должен иметь искроулавливающие устройства и располагаться над двигателем. Это особенность ограничивает длину выпускного тракта и его установку над двигателем. Требования по обеспечению обзорности с места водителя и применения некоторых навесных орудий ограничивают габариты и объем глушителя. При этом глушитель должен снизить уровень шума до уровня который не будет влиять на регламентируемые по этому параметру характеристики (внешний шум и шум на рабочем месте). В СНГ шум выпуска должен быть ниже 104 дБА на расстоянии 0,25 м от среза выпускной трубы.

Глушитель должен иметь простую и технологичную конструкцию, приемлемое аэродинамическое сопротивление. Последнее влияет на мощность и расход топлива. Пути выполнения этих требований

противоречивы, поэтому основная задача при создании тракторного глушителя – достижение оптимального сочетания перечисленных параметров, а сравнительная оценка глушителей может быть произведена только по всему комплексу характеристик.

Ограниченные длина выпускного тракта и его объем не дают возможности обеспечить требуемое уменьшение пульсации потока газов и генерируемого на выходе шума в широком диапазоне частот только за счет реактивных элементов - набора расширительных и резонансных камер. Последние просты по конструкции и имеют низкое сопротивление. 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 последовательной установки гасителей колебаний, лабиринтов, перфорированных перегородок без использования дорогостоящих и, как правило, недолговечных звукопоглощающих материалов. Снижение шума достигается за счет 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 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 в выпускной системе. 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 дает возможность инерционного отделения раскаленных частиц нагара – искрогашения. Рациональная организация движения потока газа при активном способе глушения шума дает возможность получить высокие заглушающие свойства в широком диапазоне частот при ограниченном объеме и приемлемом сопротивлении.

Приближенный расчет сопротивления глушителя может быть выполнен на основе уравнений гидравлики [1, 2, 3], а характеристики заглушения предлагаемого уравнения:

$$\Delta L = \Delta L_H + \Delta L_R + \Delta L_T, \quad (1)$$

где  $\Delta L_H, \Delta L_R, \Delta L_T$  - глушение обеспечиваемое соответственно активным, реактивным сопротивлениями и теплообменом в глушителе. Расчет составляющих и общего глушения целесообразно вести для низкочастотного шума, обусловленного пульсациями газа при открытии выпускных клапанов и высокочастотного вихревого шума.

Расчет составляющих общего глушения низкочастотного шума при проектировании выполняется по формулам:

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

где  $\Sigma H$  - суммарное гидравлическое сопротивление глушителя, Па;  $H_{TP}$  – сопротивление равновеликой по длине глушителя прямой трубе, Па;  $T_1$  и  $T_2$  – температура отработавших газов на выходе равновеликой по длине трубы и глушителя, К.

Используя известные гидравлические зависимости [2], можно рассчитать сопротивление выпускных систем:

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

без глушителя (равновеликая труба)

$$H_{TP} = \frac{\lambda \cdot S_0}{4 \cdot F_0} \cdot \frac{\gamma \cdot u^2}{2}. \quad (4)$$

Здесь  $\xi_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент сопротивления выпускной системы с глушителем;  $\gamma$  – плотность отработавших газов, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – средняя скорость потока, м/с;  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения относительно длины трубы;  $S_0$  – площадь поверхности трения, м<sup>2</sup>;  $F_0$  – площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>.

Средняя скорость потока газов рассчитывается по формуле:

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

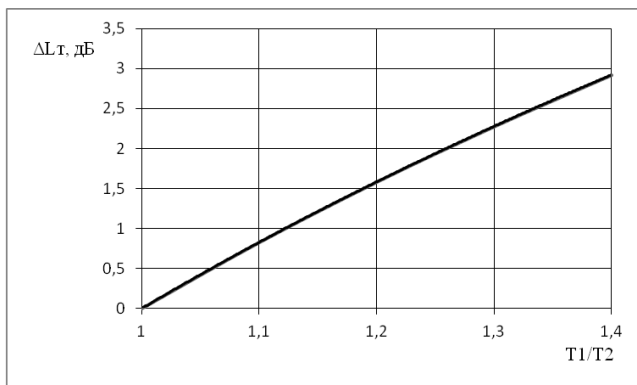
где  $\zeta_0$  и  $\mu$  – соответственно коэффициенты наполнения цилиндров и молекулярного изменения рабочей смеси;  $V_h$  - рабочий объем цилиндра двигателя, м<sup>3</sup>;  $T$  и  $T_0$  – температура отработавших газов и свежего заряда, К;  $n$  – частота вращения вала двигателя, мин<sup>-1</sup>;  $i$  – число цилиндров;  $\tau$  – 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:

$$\Delta L_{H4} = 20 \cdot \left( \lg \frac{\Sigma H}{H_{TP}} + \lg \frac{T_1}{T_2} \right); \quad (6)$$

$$\Delta L_{E4} = \frac{30 \cdot \lg \Sigma H}{H_{TP}} + \frac{20 \cdot \lg T_1}{T_2}. \quad (7)$$

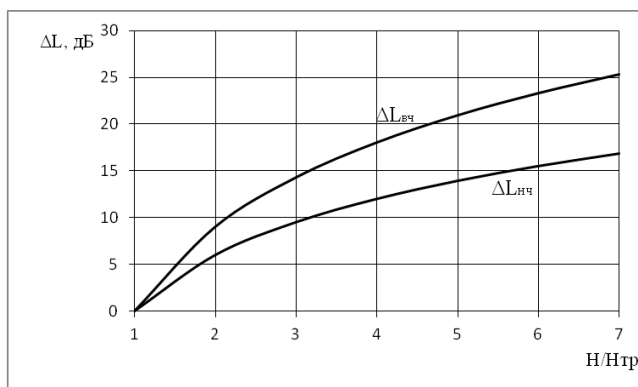
По формулам (6) и (7) выполнен расчет и построены графики иллюстрирующие вклад составляющих от сопротивления и температуры на общее заглушение (рис. 1, 2).



Источник: собственная разработка / Source: own work

Рис. 1. Расчетная зависимость глушения шума выпуска отработавших газов от снижения температуры

Fig. 1. Estimated dependency of NVH exhaust on the decrease in temperature



Источник: собственная разработка / Source: own work

Рис. 2. Расчетная зависимость глушения шума выпуска отработавших газов от сопротивления

Fig. 2. Estimated dependency of exhaust noise on the resistance

Как видно из графиков, основной компонент шумоглушения – сопротивление. В то же время, сопротивление выпуску существенно влияет на экономичность двигателя. По результатам испытаний на Минском моторном заводе определена следующая

зависимость: при  $\sum H/H_{tr} = 3,8...3,9$  удельный расход топлива в сравнении  $\sum H/H_{tr} = 1$  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. Катализатор, с точки зрения акустики, является эффективным активным глушителем. Поэтому глушитель в данном случае нужно оптимизировать по показателям требуемого заглушения и сопротивления.

### 3. Заключение

1. Работы по снижению шума должны проводиться для каждой конкретной модели трактора с учетом его комплектации и исполнения.
2. Применение только реактивных глушителей на тракторах не позволит достичь требуемых норм шума системы выпуска.
3. Приведенные математические зависимости позволяют производить предварительный расчет характеристик глушителя и оптимизировать его конструкцию в процессе доработки.

### 4. Литература

- [1] Caban J., Gęca M.S., Hunicz J., Kasperek D.: Badania modelowe układu katalizacyjnego oczyszczania spalin silnika o zapłonie samoczynnym. Logistyka, 2015, 3, 1459-1464.
- [2] Idel'chik, I. Ye.: Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. Red. M. O. Shteynberga.- 3-ye izd., pererab. i dop.-M.; Mashinostroyeniye, 1992, 672.
- [3] Krasowski E., Burski Z., Bulgakov V., Wojtiuk D., Berezovyy M.: Isledovanie dinamiki vibracij dizelnykh dvigatelej w processe ich ekspluatatsii. [AUT.]: Zbirknik naukovykh prac natsjonalnogo universitetu „Mechanizatsija silskogospodarskogo virobniatva”. T. 8. Kijev: Vidavniatvo NAU, 2000, 80-85.
- [4] Piekarski W.: Podstawy budowy pojazdów samochodowych i ciągników rolniczych. Warszawa: Wieś Jutra Sp. z o.o., 2011, 275.
- [5] Razumovskiy, M.A.: Bor'ba s shumom na traktorakh. Minsk: Nauka i tekhnika, 1973, 208 s.