

Бобер А.В.; Герасименко В.И.; Жадан В.А.; Зарянов В.А.; Крот С.Г.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ БТТ

Актуальность проблемы. Шумовое загрязнение окружающей среды является одной из главных экологических проблем нашего времени. Длительное действие шума на человека приводит, в первую очередь, к заболеваниям органов слуха, а также воздействует на центральную нервную систему и негативно влияет на внутренние органы. Шум приводит к различным патологиям в функциональном состоянии организма, таким как: заболевания органов пищеварения, сердечно-сосудистая недостаточность, неврологические расстройства, снижение остроты зрения, ухудшение памяти.

Шумовое воздействие негативно влияет и на психическое состояние человека: снижает его работоспособность, затрудняет прием, восприятие и обработку информации, уменьшает скорость реагирования и усложняет принятие оптимального решения в условиях быстро меняющейся ситуации.

Одним из основных источников шума в современном мире является автомобильный, железнодорожный и авиационный транспорт, а также сельскохозяйственная, промышленная и дорожно-строительная техника. Основным вклад в создание шума вносят их силовые установки, базой для которых, в подавляющем большинстве случаев, является двигатель внутреннего сгорания. Главным источником шума двигателя внутреннего сгорания является процесс выпуска отработавших газов, а основным средством борьбы с таким шумом – использование различных по конструкции глушителей, которые устанавливаются в систему выпуска.

С учетом важности проблемы, нормированием шума двигателей внутреннего сгорания занимаются как национальные, так и международные организации, которые разрабатывают нормативные показатели характеристик шума и методы их оценки. Уровень шума, производимого двигателями внутреннего сгорания, в большинстве стран является одним из основных показателей уровня их технического совершенства. С другой стороны, повышенный шум создает неблагоприятные условия эксплуатации транспортного средства, что приводит к снижению его конкурентоспособности и уменьшению объемов реализации на рынках сбыта.

Военной технике свойственны те же проблемы, что и гражданской, хоть нормирование шума не стоит столь жестко. Дополнительно, шум военной техники является серьезным демаскирующим фактором, затрудняющим выполнение боевых задач. В то же время, рост массы боевых машин, улучшение параметров подвижности и проходимости, повышение их мобильности, требует дальнейшего увеличения мощности двигателей, а это, в свою очередь, ведет к повышению уровня шума, излучаемого этими двигателями.

© А.В. Бобер, 2019

В настоящее время специалисты ГП «ХКБМ им. А.А. Морозова», как основного разработчика БТТ в Украине, ведут работы по проектированию новых объектов легкобронированной техники, танков, изделий на их базе и модернизируют уже существующие образцы, принимая тем самым непосредственное участие в решении задач, связанных с проблемами снижения шума военных машин.

Целью настоящей статьи является классификация систем выпуска отработавших газов, а также выработка рекомендаций по проектированию систем выпуска отработавших газов для военных машин, позволяющих конструировать глушитель с заданными характеристиками.

Основная часть. Современный двигатель является источником мощного шума. Этот шум формируется в результате сложения акустического излучения нескольких источников. Такими источниками являются узлы и агрегаты двигателя, создающие шумы механического происхождения, а также газодинамические процессы – источники аэродинамического шума.

Вклад в общий шум двигателя и характер акустического излучения каждого из этих источников различен. Он определяется следующими техническими и эксплуатационными факторами:

- типом двигателя;
- частотой вращения коленчатого вала двигателя;
- числом цилиндров;
- типом системы охлаждения;
- наличием агрегатов турбонаддува;
- типом системы выпуска отработавших газов;
- мощностными показателями двигателя и степенью его форсирования;
- особенностями конструкции двигателя (как в целом, так его отдельных узлов и деталей).
- уровнем технологичности.

Среди нескольких источников шума, как правило, выделяются доминирующие. На основании многочисленных исследований акустических характеристик двигателей различных типов и производителей, приведенных в литературе, основные источники шума двигателя можно расположить в следующем порядке по мере убывания их интенсивности:

- процесс сгорания;
- системы впуска и выпуска;
- цилиндро-поршневая группа;
- топливоподающая аппаратура;
- клапанно-распределительный механизм;
- зубчатые передачи, водяной насос и пр.

Эффективное подавление шума двигателя достигается при частичном снижении шума именно от этих доминирующих источников. Так, система выпуска отработавших

газов является неотъемлемой частью любой силовой установки с двигателем внутреннего сгорания (см. таблицу 1) и выполняет ряд основных задач:

- отвод отработавших газов от цилиндров двигателя в атмосферу;
- предотвращение попадания отработавших газов в обитаемые отделения;
- снижение уровня шума отработавших газов;
- уменьшение токсичности отработавших газов;
- охлаждение отработавших газов.

Одним из основных способов снижения шума двигателя является применение глушителей, выбор которых зависит, в первую очередь, от условий эксплуатации силовой установки, спектра ее шума и требуемой величины заглушения. Впрочем, наличие глушителя в системе выпуска отработавших газов не обязательно. Подобные конструкции систем выпуска используются для силовых установок изделий, которые будут эксплуатироваться в условиях, при которых уровень шума не имеет особого значения, например, для спортивной техники. Как известно, глушитель создает определенное противодействие выпуску и отбирает часть мощности двигателя, поэтому в системах выпуска спортивных автомобилей и мотоциклов глушители, как правило, не предусмотрены. А для некоторых образцов военной техники, например, для танков и машин на их базе, где применяется эжекционная система охлаждения, конструкция силовой установки принципиально не позволяет устанавливать глушитель в систему выпуска.

Анализ современных, успешно эксплуатирующихся систем выпуска отработавших газов автомобилей как гражданского, так и военного назначения показывает наличие большого количества конструктивных решений в зависимости от характеристик применяемых двигателей и конструкции транспортного средства.

Системы выпуска отработавших газов можно классифицировать по ряду различных признаков (см. таблицу 2), однако, в общем случае, в состав системы выпуска отработавших газов входят следующие элементы:

- выпускной коллектор двигателя либо фланец турбины;
- приемная труба глушителя;
- компенсатор угловых и линейных колебаний, а также температурных расширений;
- дополнительный глушитель (резонатор или пламегаситель);
- основной глушитель;
- соединительные трубы;
- элементы подвески.

Для большинства современных автомобилей, особенно импортного производства, с целью выполнения экологических норм ЕВРО 4, в конструкцию систем выпуска включают каталитический нейтрализатор и кислородный датчик (т.н. лямбда-зонд) – уже как обязательные части системы выпуска. В отдельных случаях в конструкцию системы выпуска может быть включен искрогаситель, уловитель сажевых частиц, моторный тормоз либо другое дополнительное устройство, предназначенное для повышения эксплуатационных или потребительских качеств изделия.

При создании силовых установок для легкобронированной техники, специалисты ГП «ХКБМ» используют хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации современные автомобильные дизельные двигатели, что соответствует мировой практике. Применение автомобильных двигателей требует соответствующего подхода при конструировании систем, обслуживающих двигатель, например, при разработке системы выпуска с глушителем в качестве основного средства снижения уровня шума.

Как правило, производитель двигателей предоставляет информацию по характеристикам рекомендуемых глушителей. Однако применение таких глушителей не всегда возможно, поэтому возникает необходимость в их самостоятельной разработке. Для ускорения проектирования и снижения стоимости систем выпуска отработавших газов изделий, разработка которых осуществляется ГП «ХКБМ», при выборе схем глушителя предпочтение отдается известным, хорошо отработанным конструкциям.

Все глушители можно условно разделить по принципу действия на: активные или диссипативные (рисунок 1), реактивные (рисунок 2) и комбинированные (рисунок 3), а по направлению потока отработавших газов – на прямоточные (рисунок 1) и лабиринтные (рисунок 2 и 3), в которых подавление шумов происходит за счет изменения направления движения газового потока.

На рисунке 1 буквами обозначены следующие составные части глушителя: А – перфорированная труба, В – предохранительный негорючий материал, С – звукопоглощающее покрытие, D и E – корпусные детали и патрубок.

Анализ современных автомобильных систем выпуска показал, что в настоящее время для снижения шума выхлопа ДВС наиболее распространены многокамерные реактивно-расширительные и комбинированные резонансно-расширительные глушители. Такие глушители представляют собой системы расширительных и резонансных камер, соединенных с помощью сплошных и перфорированных труб.

Несмотря на то, что вопросам разработки эффективных глушителей посвящено большое количество работ, задача выбора оптимальной конструктивной схемы и характеристик основных элементов системы выпуска отработавших газов в настоящее время полностью не решена.

Общие принципы конструирования глушителей заключаются в том, что на начальных этапах проектирования определяются схема и конструкция глушителя, а в результате ряда вычислений – размеры его основных частей. Выбор схемы глушителя зависит от ряда факторов [1], [2] и [7], главными из которых являются:

- спектр заглушаемого шума;
- величина требуемого глушения;
- допустимое аэродинамическое сопротивление;
- условия работы силовой установки;
- простота конструкции;
- технологичность;
- стоимость.

Окончательная конструкция глушителя для конкретного двигателя или образца техники определяется в результате длительной экспериментальной доводки, поэтому в отдельных случаях стоимость системы выпуска может достигать 10-12% стоимости всего изделия.

При расчете резонансного глушителя уровень глушения, дБА, определяется по формуле [4]

$$\Delta L = 10 \lg \left[1 + \frac{\frac{KV}{4F_0^2}}{\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2} \right], \quad (1)$$

где ΔL – величина заглушения, дБ, K – проводимость отверстий, м, V – объем резонансной камеры, м³, F_0 – площадь поперечного сечения внутренней трубы, м², f – резонансная частота, Гц, f_0 – частота, на которой определяется заглушение, Гц.

Проводимость отверстий K определяется по формуле [4]

$$K = \frac{\frac{\pi}{4} d^2 n}{l_c + \frac{\pi d}{4\varphi(\xi)}} \quad (2)$$

где d – диаметр отверстий, м, n – число отверстий; шт, l_c – толщина стенки внутренней трубы, м, $\varphi(\xi)$ – функция Фока, которая характеризует присоединенную массу воздуха в районе отверстия. Здесь d – диаметр отверстия, м, a – относительный шаг, м.

$$\xi = \frac{d}{a} \quad (3)$$

Функция Фока определяется по формуле [1]

$$\varphi(\xi) = \left(1 - 1,41\xi + 0,38\xi^3 + 0,068\xi^5 \right)^{-1} \quad (4)$$

Таблица 1 - Допустимые уровни шума для силовых установок различного назначения

Виды техники	Образцы техники	Уровень допустимого шума, дБА
Мотоциклетная техника	– мотоциклы – мотороллеры – скутеры – мопеды – снегоходы – прочая мототехника	80-87
Автомобильная техника	– легковые автомобили – грузовые автомобили – автобусы – прочая автомобильная техника	75-83
Сельско-хозяйственная техника	– тракторы – комбайны – самоходные шасси – прочая техника	84-87
Дорожно-строительная техника	– бульдозеры – скреперы – грейдеры – асфальтоукладчики – катки – прочая техника	84-103
Строительная техника	– автокраны – бетономешалки – погрузчики – экскаваторы – прочая техника	87-102
Судовые энергетические установки	– речные и морские суда – катера, лодки, яхты – плавучие краны, доки – вспомогательное оборудование и пр.	86-98
Стационарные энергоустановки	– генераторные – компрессорные – вентиляционные – газотурбинные – прочие станции	95-118
Железнодорожный транспорт	– локомотивы – дрезины, мотрисы – мотор-вагоны – путевая и мосто-строительная техника – прочая техника	87-96
Авиационные силовые установки	– самолеты – вертолеты	110-125
Бытовой инструмент	– мотокосилки – мотоблоки – бензопилы – снегоуборочные машинки – бытовые генераторы – прочая техника	98-103

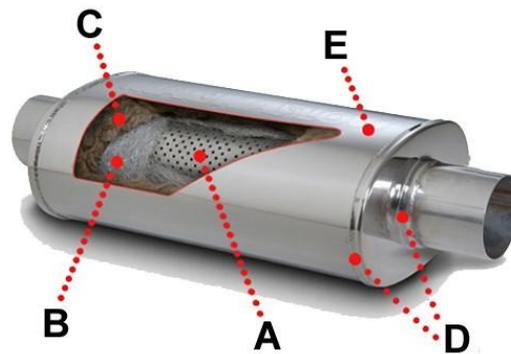


Рисунок 1 – Глушитель активного типа



Рисунок 2 – Глушитель реактивного типа

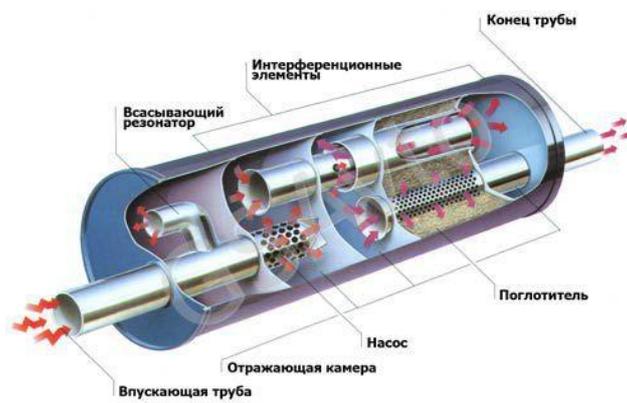


Рисунок 3 – Глушитель комбинированного типа

Таблиця 2 - Класифікація систем випуску отработавших газів

По типу ДВС	– двухтактный – четырехтактный
По типу используемого топлива	– бензин – дизельное топливо – прочие виды топлива
По наличию устройства подавления шума	– без глушителя – с глушителем
По способу глушения шума	– активный – реактивный – комбинированный
По конструкции глушителя	– прямоточный – лабиринтный
По способу нейтрализации отработавших газов	– без каталитического нейтрализатора – с каталитическим нейтрализатором
По способу компенсации вибраций и тепловых расширений	– без компенсатора – с компенсатором – с жестким креплением элементов – с подвижным креплением элементов
По типу соединения элементов	- фланцевые -«труба в трубе»
По используемому материалу	– сталь конструкционная – нержавеющая сталь – алюминизированная сталь
По наличию дополнительных устройств	– моторный тормоз – дополнительный глушитель (резонатор) – пламегаситель – устройства для впрыска смеси AdBlue – уловитель сажевых частиц и пр.

Частота настройки резонансного глушителя рассчитывается по формуле [6]

$$f_0 = \frac{c_0 \sqrt{\frac{T}{273}}}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{V}}, \quad (5)$$

где c_0 – скорость распространения звука в воздухе или газе при нормальных условиях, м/с, T – температура воздуха или газа, $^{\circ}\text{K}$

Расчет резонансного глушителя ведется в следующем порядке:

- по частоте настройки f_0 и температуре T воздуха или газа в глушителе и принятому объему V по формуле (5) определяется проводимость отверстий K ;
- по найденной проводимости отверстий K , объему V , площади поперечного сечения внутренней трубы F_0 по формуле (1) определяется заглушение ΔL в выбранном диапазоне частот;
- задаваясь толщиной стенки внутренней трубы l_c , диаметром d и шагом a , по найденной проводимости K определяется необходимое число отверстий n по формуле (2).

Акустический расчет расширительной камеры ведется по формуле [1]

$$\Delta L = 10 \lg \left[1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi l}{c_0 \sqrt{\frac{T}{273}}} \right], \quad (6)$$

где ΔL – величина заглушения, дБ, m – степень расширения.

$$m = \frac{F_k}{F_{mp}}, \quad (7)$$

где F_k – площадь сечения камеры расширения, м^2 , F_{mp} – площадь сечения трубопровода, м^2 , l – длина расширительной камеры, м.

При выборе схем глушителей и определении их основных размеров целесообразно руководствоваться следующими рекомендациями, которые получены в результате испытаний глушителей, спроектированных по методикам, изложенным в ряде источников [1-3,5]:

- увеличение объема глушителя повышает эффективность глушения на низких частотах; при этом увеличение диаметра глушителя предпочтительнее увеличения его длины. Как правило, используют глушители с объемом в 20-30 раз большим, чем объем двигателя;

- оптимальное число расширительных и резонансных камер в глушителе – не более трех, при этом длины камер глушителя должны быть различными и не должны быть кратными длине первой камеры. Лучше всего подходит ряд значений длин, починающийся последовательности нечётных дробей, например $7/9$, $5/7$, $3/5$ от длины первой камеры;

- применение резонансной камеры, как правило, увеличивает эффективность рассматриваемого глушителя в узком диапазоне частот;

- использование перфорации в конструкции глушителя увеличивает эффективность глушителя на средних и высоких частотах. Перфорация выполняется в соединительных трубах и в перегородках. Более целесообразно использовать перфорацию с диаметром отверстий от 4 до 8 мм.

- изменение направления потока газов также повышает эффективность глушителя на средних и высоких частотах. Многократный поворот потока газов приводит к возрастанию гидравлического сопротивления, поэтому осуществлять поворот потока газов в глушителе необходимо в пределах 90° - 360° , при этом особенно эффективен поворот на 90° непосредственно на выходе из глушителя.

- звукопоглощающий материал в глушителях используется ограниченно. В качестве звукопоглощающей набивки обычно используют волокнистые или пористые те-

плостойкие материалы, с перфорированным предохранительным слоем, при этом коэффициент перфорации должен быть не менее 0,2-0,25;

– форма корпуса глушителя не оказывает значительного влияния на его акустическую эффективность, но предпочтительнее использование глушителей с корпусом округлой или эллипсоидной форм, которые не способствуют формированию поперечных и продольных собственных мод колебаний объема газа;

– боковой подвод потока отработавших газов к глушителю, при котором происходит направление потока отработавших газов на противоположающую криволинейную стенку корпуса, снижает нежелательный структурный шум, излучаемый непосредственно стенками корпуса.

Заключение. Таким образом, глушители шума выпуска отработавших газов являются неотъемлемой частью выхлопных систем двигателей внутреннего сгорания, а их конструкции оказывают серьезное влияние на эксплуатационные характеристики силовых установок. По различным оценкам, ежегодно в мире выпускается только новых глушителей около 60 млн. единиц, а финансовый оборот этого сегмента промышленности составляет от 10 до 12 млрд. долларов.

Анализ современных тенденций проектирования систем выпуска в автомобилестроении показывает наличие большого числа технических решений в зависимости от характеристик выпускаемых двигателей и конструктивных особенностей изделия в целом. Следует отметить, что выхлопная система современного транспортного средства – это точно рассчитанная сложная система, подобранная именно к данному двигателю. Ее параметры напрямую зависят от таких характеристик двигателя как рабочий объем, мощность, степень сжатия и частота вращения. При выборе схемы системы выпуска необходим комплексный подход, т.к. каждому типу глушителя свойственны как преимущества, так и недостатки.

Так, при конструировании глушителя проектировщику необходимо обеспечить ряд основных требований, сформулированных во многих источниках [1-3,6,7], хотя на практике обычно удается реализовать только несколько из них:

- высокая акустическая эффективность;
- минимальные габариты и масса;
- малое гидравлическое сопротивление;
- конструктивная и технологическая простота;
- стабильность характеристик в процессе эксплуатации;
- несложность эксплуатации;
- невысокая стоимость.

При детальном рассмотрении автомобильных систем выпуска отработавших газов, можно сделать вывод, что за последнее десятилетие конструкция глушителей не претерпела революционных изменений. Несмотря на заинтересованность производителей автомобильной техники в компактных эффективных глушителях, качественного улучшения их характеристик не достигнуто. По-прежнему, для снижения шума выхлопа ДВС наиболее распространены многокамерные комбинированные реактивно-расширительные и резонансно-расширительные глушители, т.к. имеют приемлемые габаритные размеры и гидравлическое сопротивление.

Подобные глушители представляют собой системы расширительных и резонансных камер, соединенных между собой с помощью сплошных и перфорированных труб и/или перфорированных перегородок, в которых снижение шума происходит за счет изменения направления движения и линеаризации потока газов во внутренних полостях глушителя. В некоторых конструкциях используются звукопоглощающие материалы.

Глушители, разработанные специалистами ГП «ХКБМ им. А.А.Морозова», спроектированы по хорошо известным схемам и успешно применяются в системах вы-

пуска отработавших газов на изделиях БТР-4Е, БТР-4В, БТР-4А, ТБКМ «Дозор-Б» и др.

Литература: 1. Бердников Л.А., Шишкин Д.А., Пачурин Г.В. Расчетные исследования влияния геометрических параметров резонансного (перфорированного) глушителя шума на эффективность снижения уровня шума // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2-4. – С. 701-703. 2. Борьба с шумом на производстве / Под общ. ред. Е.Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с. 3. Колесников А.Е. Шум и вибрация. – Л.: Судостроение, 1988. – 248 с. 4. Техническая акустика транспортных машин / Под ред. Н.И. Иванова. – СПб.: Политехника, 1992. – 365 с. 5. Иванов Н.И. Борьба с шумом и вибрациями на путевых и строительных машинах. – М.: Транспорт, 1978. – 272 с. 6. Григорьян Ф.Е., Перцовский Е.А. Расчет и проектирование глушителей шума энергоустановок. – Л.: Энергия, 1980. – 120 с. 7. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.

Bibliography (transliterated): 1. Berdnikov L.A., SHishkin D.A., Pachurin G.V. Raschetnye issledovaniya vliyaniya geometricheskih parametrov rezonansnogo (perforirovannogo) glushitelya shuma na effektivnost' snizheniya urovnya shuma // *Fundamental'nye issledovaniya*. – 2015. – № 2-4. – S. 701-703. 2. Bor'ba s shumom na proizvodstve / Pod obshch. red. E.YA. YUdina. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 400 s. 3. Kolesnikov A.E. SHum i vibraciya. – L.: Sudostroenie, 1988. – 248 s. 4. Tekhnicheskaya akustika transportnyh mashin / Pod red. N.I. Ivanova. – Spb.: Politekhnika, 1992. – 365 s. 5. Ivanov N.I. Bor'ba s shumom i vibraciyami na putevyh i stroitel'nyh mashinah. – M.: Transport, 1978. – 272 s. 6. Grigor'yan F.E., Percovskij E.A. Raschet i proektirovanie glushitelej shuma energoustanovok. – L.: Energiya, 1980. – 120 s. 7. Ivanov N.I. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom. – M.: Universitetskaya kniga, Logos, 2008. – 424 s.

Бобер А.В., Герасименко В.И., Жадан В.А., Зарянов В.А., Крот С.Г.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ БТТ.

Целью настоящей статьи является классификация систем выпуска отработавших газов, а также выработка рекомендаций по проектированию систем выпуска отработавших газов для военных машин, позволяющих конструировать глушитель с заданными характеристиками.

Бобер А.В., Герасименко В. И., Жадан В.А., Зарянов В.А., Крот С.Г.

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ВИПУСКУ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ БТТ.

Метою даної статті є класифікація систем випуску відпрацьованих газів, а також розробка рекомендацій щодо проектування систем випуску відпрацьованих газів для військових машин, що дозволяють конструювати глушник із заданими характеристиками.

A. Bober, V. Gerasimenko, V. Zhadan, V. Zaryanov, S. Krot

DESIGN OF EXHAUST GASES SYSTEM FOR ARMoured VEHICLES.

THE PURPOSE of this article is to classify exhaust systems and develop recommendations for the design of exhaust systems for military vehicles that allow to design a silencer with specified characteristics.