

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ ШУМА, ИЗЛУЧАЕМОГО АГРЕГАТАМИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

к.т.н. **Победин А.В.**, д.т.н. **Ляшенко М.В.**, д.т.н. **Шеховцов В.В.**, **Долотов А.А.**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

tslmv@vstu.ru

В статье рассматривается проблема снижения шумности автотранспортных средств. Шумовое загрязнение окружающей среды является важной экологической проблемой. В настоящее время уровень городского транспортного шума варьируется в пределах от 70 до 95 дБА, что существенно превышает действующие санитарные нормы. Основным источником шума автомобиля является двигатель и его системы. В шуме двигателя выделяют компоненту, обуславливаемую процессом сгорания, и компоненту механическую. Следующим по значимости источником шума являются узлы трансмиссии. В них шум генерируется зубчатыми передачами, подшипниками и быстро вращающимися валами. Шины движущегося легкового автомобиля являются одним из основных источников вибрации и шума при высоких скоростях движения (начиная с 80–90 км/ч). Источниками шума аэрогидродинамического происхождения являются стационарные или нестационарные процессы в газах. Одним из наиболее интенсивных аэродинамических источников шума является вихреобразование в проточных частях механизмов. При движении автомобиля в потоке воздуха он является источником турбулентности, поэтому шум с увеличением скорости движения возрастает. Авторами выполнен ряд экспериментальных исследований шумоизлучения отдельных агрегатов легкового автомобиля: двигателя, коробки передач, карданной передачи, дифференциала, системы выхлопа. С учетом результатов экспериментальных исследований предложена методика вероятностной расчетной оценки шума автомобиля. Создана математическая модель расчета ожидаемой шумности в салоне легкового автомобиля, которая позволяет получать не только математическое ожидание уровней шума от каждого агрегата и его спектральные составляющие, но и их разброс. На основе модели создана программа, позволяющая получать спектральные составляющие шума от каждого из источников в третьоктавных полосах частот с оценкой вероятного разброса их значений (доверительных интервалов) еще на этапе проектирования автомобиля, что позволяет уже на стадии проектирования закладывать необходимые характеристики шумоизлучения агрегатов и автомобиля в целом. Созданная методика может с успехом использоваться также для оценки характеристик шумоизлучения других машин – грузовых и иных автомобилей, автобусов, колесных и гусеничных тракторов, рабочих сельскохозяйственных машин.

Ключевые слова: уровень шума, экспериментальные исследования, излучение шума агрегатами автомобиля, вероятностная оценка шумности автомобиля.

Введение

Шумовое загрязнение окружающей среды является важной экологической проблемой. В настоящее время уровень городского транспортного шума варьируется в пределах от 70 до 95 дБА, что существенно превышает действующие санитарные нормы [1–4]. Так, в Волгограде он достигает 82 дБА [5]. Одним из путей снижения транспортного шума является уменьшение вклада в него каждого отдельного автомобиля.

Несмотря на постепенное обновление автопарка России, доля автомобилей с пробегом 10–20 лет составляет около 28 % [6]. Даже новые автомобили одной модификации, сошедшие с конвейера в одно и в тоже время, имеют

отличающиеся друг от друга шумовые характеристики; и некоторый их процент не проходит по санитарным нормам [7]. Тем временем производителями не приводятся данные по статистической оценке шумности конкретных моделей, в доступной научной литературе отсутствует и расчетная оценка разброса шумности автомобилей с учетом особенностей их компоновки, акустических характеристик узлов и каналов поступления звуковых волн к расчетным точкам.

Целью работы является разработка расчетной методики, позволяющей на стадии проектирования автомобиля рассчитать вероятное математическое ожидание его шумности и внести необходимые конструктивные корректировки для ее снижения.

Основные источники шума

Основным источником шума автомобиля является двигатель и его системы [7]. В шуме двигателя выделяют компоненту, обуславливаемую процессом сгорания, и компоненту механическую. С увеличением частоты вращения преобладающим становится механический шум, вызываемый соударениями деталей двигателя, главным образом, перекладкой поршня в цилиндре. Причинами разброса уровней звукового давления служит остаточная неуравновешенность двигателя, разные (в пределах допусков) массо-инерционные параметры поршней и других подвижных деталей, неточности изготовления деталей клапанного механизма, регулировочные зазоры в сопряжениях и др.

Следующим по значимости источником шума являются узлы трансмиссии [7]. В них шум генерируется зубчатыми передачами, подшипниками и быстро вращающимися валами. Причинами разброса амплитуд колебаний деталей, а значит, и уровней звукового давления, служат погрешности изготовления шестерен, недостаточная центровка валов и их прогиб, статическая и динамическая неуравновешенность вращающихся деталей, периодические и непериодические соударения движущихся деталей, трение в сопряжениях, неточная регулировка и установка подшипников. На основе математического моделирования получена показанная на рис. 1 зависимость уровня излучаемого шума от зазора в зубьях шестерен коробки передач. Показано, что при увеличении

зазора уровень излучаемого шума существенно (до 20 дБ) увеличивается.

Шины движущегося легкового автомобиля являются одним из основных источников вибрации и шума [7] при высоких скоростях движения (начиная с 80–90 км/час). Основными факторами, определяющими разброс уровней шума, излучаемого разными колесами, является их остаточная разбалансировка, нестабильность регулировки подшипников, отклонение рисунка протектора от номинального.

Источниками шума аэрогидродинамического происхождения [7] являются стационарные или нестационарные процессы в газах. Одним из наиболее интенсивных аэродинамических источников шума является вихреобразование в проточных частях механизмов. При движении автомобиля в потоке воздуха он является источником турбулентности, поэтому шум с увеличением скорости движения возрастает. Разброс значений уровня внутреннего шума на одном и том же участке дороги при одних и тех же условиях может достигать 5 дБ. Это связано, в основном, с изменением скорости потока воздуха, обтекающего автомобиль.

Экспериментальные исследования уровня шума основных узлов

Выполнена серия экспериментальных исследований уровня шума основных узлов (двигатель, коробка передач, карданная передача, дифференциал, система выхлопа) автомобилей ГАЗ-3110 разных годов выпуска. Замеры проводились на стенде (рис. 2) при фиксированных

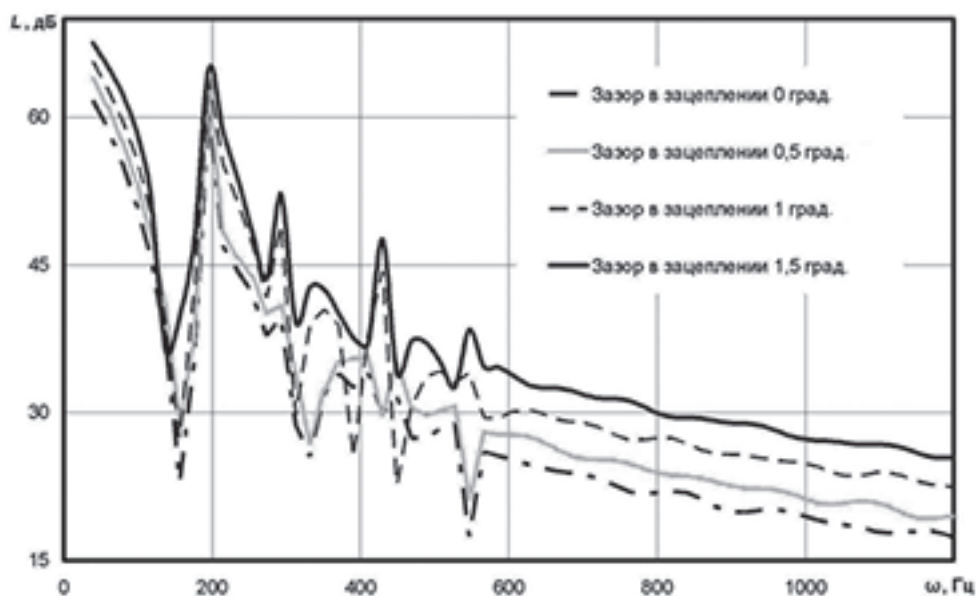


Рис. 1. Спектр шума при частоте вращения входного вала 1000 мин^{-1}

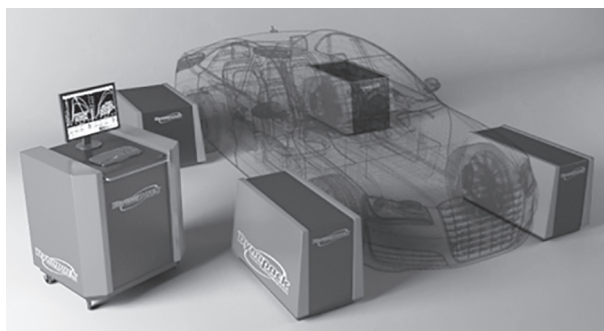


Рис. 2. Общий вид стенда DynaPack 4WD

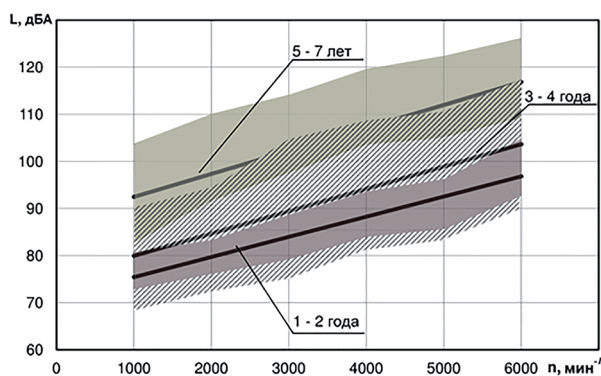
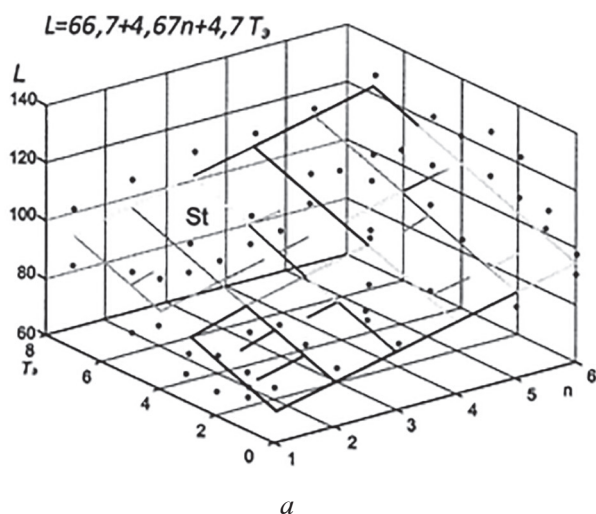


Рис. 3. Зависимость и разброс уровня шума от частоты вращения и срока эксплуатации

частотах вращения коленчатого вала двигателя и включенных передачах.

Обработка и анализ результатов экспериментов показали, что шум автомобилей и отдельных его агрегатов, даже одного года выпуска, имеет существенный разброс (рис. 3). При этом год выпуска 2006–2007 соответствует сроку эксплуатации до 2 лет, 2004–2005 – 3–4 года, 2000–2003 – 5–7 лет.

Рис. 4. Двухфакторное уравнение регрессии: а – регрессионная плоскость; б – вид вдоль регрессионной плоскости; (n – частота вращения, $\text{мин}^{-1}/1000$; T_3 – время эксплуатации, год; L – шум, дБА)

В результате обработки массива экспериментальных данных получены двухфакторные (рис. 4) и многофакторные (1) уравнения регрессии для основных измерительных точек автомобиля, позволяющие учитывать влияние на уровень звукового давления агрегатов частоты вращения коленвала (n , мин^{-1}), нагрузки (M , Н·м) и срока эксплуатации автомобиля (T_3 , год).

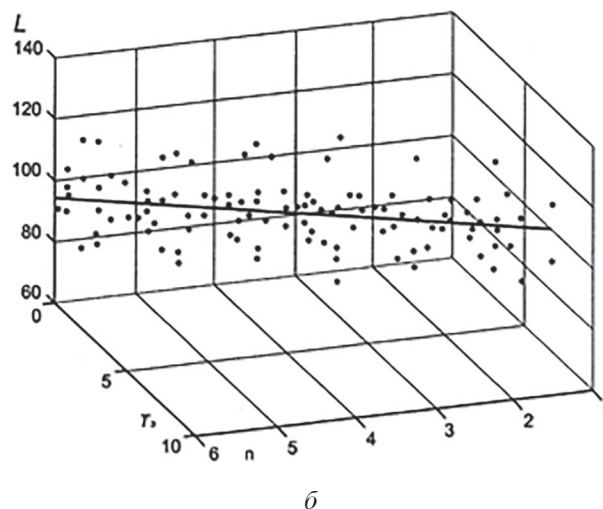
Например, для ближнего поля главной передачи:

$$L = 90,3 + 0,00074 \cdot (n - 3500) + 0,051 \cdot (M - 50) + 5,58 \cdot (T_3 + 2,5) \pm 4 \cdot t \cdot \sigma_i, \quad (1)$$

где t – критерий Стьюдента; σ_i – среднеквадратическая характеристика разброса шума, дБ.

Для исследования влияния приложенного к ведущим колесам момента сопротивления на звуковое излучение агрегатов использовался динамометрический стенд DynaPack 4WD (рис. 2). На стенде выполнена серия экспериментальных исследований, во время которых регистрировалась частота вращения коленвала, крутящий момент на ведущих колесах и номер включенной передачи. Исследования проводились на частотах вращения 1000, 2000, 3000, 4000 мин^{-1} на разных передачах. Для примера одна из полученных зависимостей уровня звукового давления на 3 передаче при частоте вращения 2000 мин^{-1} приведена на рис. 5.

Результаты исследований показали, что увеличение момента сопротивления на ведущих колесах в той или иной мере приводит к увеличению звукового излучения всех агрегатов. Наиболее восприимчивым к увеличению внешней нагрузки по уровню звукового давления является двигатель. Так, при увели-



чении внешнего момента от 20 до 80 Н·м его шум увеличивается от 73 до 98 дБА. При тех же внешних условиях нагружения излучаемый уровень карданной передачи и дифференциала увеличился с 93 до 95 дБА, коробки передач с 97 до 101 дБА, шум выхлопа с 82 до 87 дБА, а шум в салоне с 76 до 78 дБА.

Выполнены также исследования влияния на уровень шума коробки передач частоты вращения коленчатого вала. Исследования показали, что наибольшее изменение уровня шума при уменьшении передаточного числа в коробке передач наблюдается на низких частотах (до 2500 об/мин); на более высоких частотах оно практически не приводит к увеличению общего уровня шума.

Проверка распределения излучения шума агрегатами автомобиля по критерию Пирсона показала, что оно подчиняется нормальному закону.

Разработка методики вероятностной расчетной оценки шума

С учетом результатов экспериментальных исследований предложена методика вероятностной расчетной оценки шума на примере автомобиля ГАЗ-3110, с использованием которой на стадии проектирования возможно закладывать необходимые характеристики шумоизлучения транспортных средств. В качестве исходной принята методика [8], разработанная профессором Н.И. Ивановым на основе статистической теории акустики. В расчетных зависимостях, позволяющих определить долю отдельных источников в общем шуме автомобиля, в качестве начальных данных используются результаты экспериментов – спектры акустической мощности отдельных агрегатов, определенные с учетом их дисперсии. При этом для оценки суммарного разброса шума можно воспользоваться известной формулой энергетического сложения с учетом вероятного отклонения Δ_L :

$$L = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{(0,1L_i)} \right) + \Delta_L, \quad (2)$$

где L_i – звуковая мощность i -того источника шума; n – число источников шума транспортного средства.

Если обозначить через Δ_i предельное отклонение значений величины L_i (можно считать половину доверительного интервала для величины L_i), то получим, что:

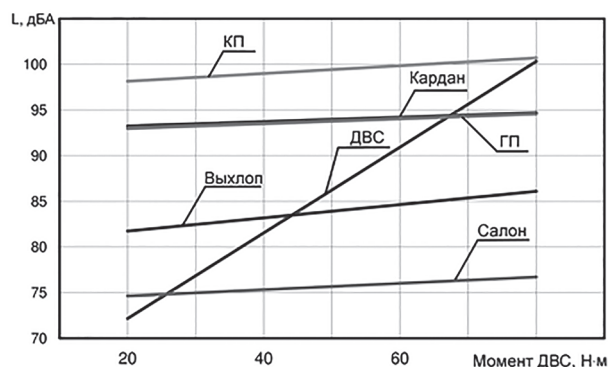


Рис. 5. Изменение уровня шума от крутящего момента ДВС

$$\Delta_L \leq \frac{\sum_{i=1}^n 10^{(0,1L_i)} \cdot \Delta_i}{\sum_{i=1}^n 10^{(0,1L_i)}}. \quad (3)$$

Тогда с учетом выражений (2) и (3):

$$L = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{(0,1L_i)} \right) + \frac{\sum_{i=1}^n 10^{(0,1L_i)} \cdot \Delta_i}{\sum_{i=1}^n 10^{(0,1L_i)}}. \quad (4)$$

При этом очевидно, что первое слагаемое в этом выражении можно принять за математическое ожидание суммарного расчетного уровня шума, а второе определяет предельно возможное отклонение действительного значения от среднего (математического ожидания).

Анализ выражения (4) показывает, что погрешность энергетической суммы (определяющей разброс значений) не превосходит максимальной погрешности слагаемого.

Аналогично, можно получить формулы для разброса других составляющих общего шума.

С учетом (4) получено общее выражение для расчета шума, проникающего через открытые проемы капота, панели ограждения и систему охлаждения (радиатор) и достигающего панелей салона снаружи:

$$L_i = L_{w_i} + C_1(W) + 3И + b_i - a_i + 10 \lg(1 - \bar{a}_3) + \text{ПН} - \beta - C - X + \Delta_i, \quad (5)$$

где L_{w_i} – уровень звуковой мощности i -того источника; b_i – показатель, учитывающий соотношение между площадями i -ой панели капота, открытыми проемами капота и общей площадью капота; a_i – показатель, учитываю-

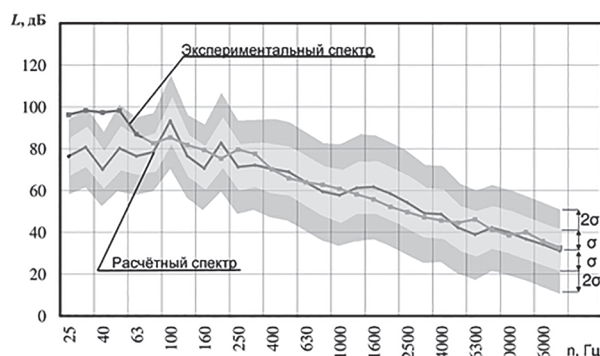


Рис. 6. Спектр шума в салоне автомобиля и его отклонение

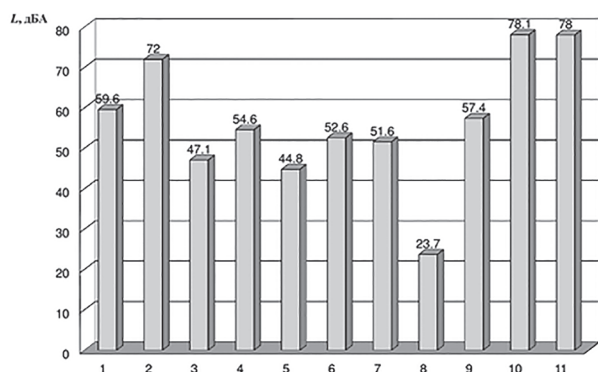


Рис. 7. Расчетные значения внутреннего шума ГАЗ-3110:

- 1 – доля шума двигателя, проникающего через нижний открытый проем в капоте; 2 – доля шума двигателя, проникающего через панели ограждения капота; 3 – доля шума двигателя, проникающего через ограждение радиатора; 4 – доля шума от коробки передач; 5 – доля шума от главной передачи; 6 – доля шума от передних шин; 7 – доля шума от задних шин; 8 – доля шума от выхлопной трубы; 9 – доля шума от карданной передачи; 10 – суммарный шум в салоне; 11 – экспериментальное значение

щий расстояния от источника шума до расчетной точки и высоту проемов; ПН – показатель направленности; $\bar{a}_3$ – средний коэффициент звукопоглощения; β – добавка, зависящая от расположения источника шума; C – числовая добавка (при проникновении шума через панели ограждения $C = 12,5$, через открытый проем $C = 14$, в открытое пространство $C = 0$); X – числовая добавка, которая при $\Omega = 2\pi$ равна 5 дБ, при $\Omega = 2\pi - 8$ дБ, при $\Omega = 4\pi$ – 11 дБ (Ω – пространственный угол излучения источников, при излучении в открытое пространство он составляет 4π , в полупространство – 2π , в двухгранный угол – π ;

$C_1(W)$ – расчетный показатель; ЗИ – приведенная звукоизоляция капота.

Источниками шума (L_i) являются двигатель, коробка передач, главная передача, передние и задние шины, система выхлопа, карданный вал.

Шум внутри салона у каждой панели от каждого источника считается по формулам, имеющим одинаковую структуру:

$$L_{BH} = L_{НАР} - \text{ЗИ} + 10 \lg \frac{S_j}{S_{\text{ОБ}} \alpha_{\text{СР}}} - t, \quad (6)$$

где $L_{НАР}$ – наружный шум у j -той панели ограждения; ЗИ – звукоизоляция j -той панели; t – вектор добавок к звукоизоляции; S_j – площадь j -той панели; $S_{\text{ОБ}} = \sum_{j=1}^n S_j$ – общая площадь панелей; $\alpha_{\text{СР}}$ – коэффициент звукопоглощения j -той панели.

Предельное отклонение вычисляется по формуле:

$$\Delta_{L_{BH}} = \Delta_{L_{НАР}} + \Delta_{\text{ЗИ}} + 10 \lg e \frac{\Delta_{\alpha_{\text{СР}}}}{\alpha_{\text{СР}}}. \quad (7)$$

Таким образом, выражение (7) позволяет рассчитать внутренний шум в салоне автомобиля, учитывая не только математическое ожидание уровней шума и его спектральных составляющих, но и их возможный разброс.

На основе предложенной методики в пакете *Matlab* создана программа, позволяющая получать спектры и общие уровни шума, проникающего в салон автомобиля через различные панели и от разных источников, с оценкой вероятного разброса их значений.

Для примера на рис. 6 показаны спектры шума в салоне автомобиля, полученные экспериментальным и расчетным путями. На рис. 7 приведен график, показывающий вклад отдельных источников в общий шум в салоне.

Расхождение между расчетным и экспериментальными значениями наблюдается только в области низких частот. В области высоких частот разность не превышает 2–3 дБ, а по общему уровню (шкала А) она составляет 0,1 дБА, что позволяет говорить о достаточно хорошей сходимости результатов экспериментальных и расчетных данных, полученных по предложенной методике.

Выводы

Предложены методика и математическая модель расчета ожидаемой шумности в салоне

легкового автомобиля, которая позволяет получать не только математическое ожидание уровней шума от каждого агрегата и его спектральные составляющие, но и их разброс.

На основе математической модели создана программа, позволяющая получать спектральные составляющие шума от каждого из источников в третьоктавных полосах частот с оценкой вероятного разброса их значений (доверительных интервалов) еще на этапе проектирования автомобиля, что позволяет уже на стадии проектирования закладывать необходимые характеристики шумоизлучения агрегатов и автомобиля в целом.

Предложенная методика может быть использована также для оценки характеристик шумоизлучения других машин: грузовых и иных автомобилей, автобусов, колесных и гусеничных тракторов, рабочих сельскохозяйственных машин.

Литература

1. Заборщикова Н.П., Петрякова С.В. Шум города. Оценка и регулирование шумового режима селитебных территорий. М.: Издательство АСВ; СПб.; СПбГАСУ. 2004. 112 с.
2. Вялышев А. Шум вокруг нас // Наука и жизнь. 2006. № 4. С. 80–88.
3. ГОСТ Р 52231-2004 Внешний шум автомобилей в эксплуатации. Допустимые уровни и методы измерения. М.: ИПК Издательство стандартов. 2004. 7 с.
4. ГОСТ Р 51616-2000 Автомобильные транспортные средства. Шум внутренний. Допустимые уровни и методы испытаний с Изменением № 1 от 01.09.2009. М.: Изд-во стандартов. 2007. 33 с.
5. Адайлах В.М. Внешний шум легкового автомобиля и возможности его снижения: дис... канд. техн. наук. Волгоград. 2000. 233 с.
6. Долгов А.К., Косов О.Д., Победин А.В., Соколов-Добрев Н.С., Долотов А.А. О возможности выделения шума КПП из общего спектра // Автомобильная промышленность. 2012. № 6. С. 39.
7. Вайнштейн Л.Л. Исследование источников шума легкового автомобиля и путей его уменьшения: автореф. дис...канд. техн. наук. Волгоград. 1980. 23 с.
8. Долгов К.О., Долотов А.А., Косов О.Д., Победин А.В., Соколов-Добрев Н.С. О возможности выделения шума КПП из общего спектра // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: матер. междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомоб. инж. (ААИ), посвящ. 145-летию МГТУ «МАМИ». М.: МГТУ «МАМИ». 2010. Кн. 1 (Секция 1). С. 92–94.
9. Долотов А.А., Победин А.В. Математическая модель вероятностного расчета шумности легковых автомобилей // Прогресс транспортных средств и систем – 2013: матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24–26 сент. 2013 г. / ВолГГТУ [и др.]. Волгоград. 2013. С. 163–164.

References

1. Zaborshchikova N.P. City noise. Evaluation and regulation of noise regime of residential areas. N.P. Zaborshchikova, S.V. Pestryakova. M.: ASV Publishing company, St. Petersburg.; SPbGASU, 2004. 112 p.
2. Vyalyshv A. Noise around us. *Science and life*. 2006. № 4. pp. 80–88
3. GOST P 52231-2004 External noise of motor vehicles. Permissible levels and methods of measurements. M., IPK Publishing company of standards, 2004. 7 p.
4. GOST P 51616-2000 Motor vehicles. Internal noise. Permissible levels and methods of tests with reduction № 1 dated 01.09.2009. M.: Publisher of standards, 2007. 33 p.
5. Aydalekh, V.M. External noise of motor vehicle and ways for reducing it: thesis of Ph.D.: 05.05.03. Aydalekh V.M.; Volgograd state technical university. Volgograd, 2000. 233 p.
6. About possibility of recognize the gearbox noise in the general specter. K.O. Dolgov, O.D. Kosov, A.V. Pobedin, N.S. Sokolov-Dobrev, A.A. Dolotov. *Automotive industry*. 2012. № 6. p. 39
7. Vainshtein L.L. Research of noise sources in passenger car and ways for reducing it: abstract of Ph.d. thesis: 05.05.03. Volgograd polytechnic institute. Volgograd, 1980. 23 p.
8. About possibility of recognize the gearbox noise in the general specter. K.O. Dolgov, O.D. Kosov, A.V. Pobedin, N.S. Sokolov-Dobrev, A.A. Dolotov. *Automobile- and tractor production in Russia: priorities of development and personnel training: procedeeings of international scientific and technical conference of automotive engineers association (AEA), dedicated to 145 anniversary of MSTU "MAMI". Moscow state technical university "MAMI". M.: 2010. sec. 1. pp. 92–94.*
9. Dolotov A.A., Pobedin A.V. Mathematical model of probabilistic computation of passenger car noise. *Progress of vehicles and transportation systems – 2013: proceedings of international scientific-practice conference*, Volgograd, 24–26 sept. 2013. VSTU. Volgograd, 2013. pp. 163–164.

METHOD OF CALCULATION OF PROBABILISTIC ESTIMATION OF NOISE EMITTED BY PASSENGER AUTOMOBILE AGGREGATES

Ph.D. **A.V. Pobedin**, Dr. Eng. **M.V. Lyashenko**, Dr. Eng. **M.V. Shekhovtsov**, **A.A. Dolotov**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

tslmv@vstu.ru

The article deals with the problem of noise reduction of vehicles. Noise pollution is an important environmental problem. Currently, the level of urban traffic noise varies from 70 to 95 dBA, which significantly exceeds the current sanitary standards. The main source of vehicle noise is the engine and its systems. In the engine noise, the component caused by the combustion process and mechanical component are mentioned. The next most important source of noise are transmission units. In them, noise is generated by gears, bearings and fast rotating shafts. Tires of a moving vehicle are one of the main sources of vibration and noise at high speeds (from 80–90 km / h). Sources of noise of aerohydrodynamic origin are stationary or nonstationary processes in gases. One of the most intense aerodynamic sources of noise is vortex formation in flowing parts of mechanisms. When the vehicle is moving in the air stream, it is a source of turbulence, so noise increases with increasing speed. The authors carried out a number of experimental studies of the noise emission of individual units of a automobile – engine, gearbox, cardan gear, differential, exhaust system. Taking into account the results of experimental studies, a technique is proposed for the probabilistic calculation of the vehicle noise. A mathematical model is developed for calculating the expected noise in the passenger compartment of passenger automobiles, which allows obtaining not only the mathematical expectation of noise levels from each unit and its spectral components, but also their dispersion. On the basis of the model, a program has been created that makes it possible to obtain the spectral noise components from each of the sources in one-third octave bands with an estimate of the probable range of their values (confidence intervals) even at the design stage of the vehicle, which allows us, at the design stage, to lay down the necessary characteristics of the noise emission of aggregates and the automobile as a whole. The created technique can be successfully used also for an estimation of characteristics of noise emission of other vehicles – cargo and other automobiles, buses, wheeled and caterpillar tractors, agricultural machines.

Keywords: noise level, experimental research, noise emission by automobile aggregates, probabilistic evaluation of automobile noise.