

Исследование уровня акустического излучения системы «шины автотранспортного средства – дорожное покрытие»

Васильев А.В.¹, Комлик Е.А.²

¹ Заведующий кафедрой «Химическая технология и промышленная экология»

² Научный сотрудник

^{1,2} Самарский государственный технический университет, адрес: 443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская, 244

Аннотация

Рассматриваются вопросы исследования шума автомобильного транспорта в условиях урбанизированных территорий. Проведен анализ акустического излучения, создаваемого шинами автотранспортного средства при его движении. Рассмотрены подходы к расчету уровня звука системы «шины автотранспортного средства – дорожное покрытие». Описано программное приложение для определения шума шин при движении автотранспортного средства. Результаты исследований позволяют осуществлять эффективную оценку шума автотранспорта и разрабатывать эффективные мероприятия по его снижению путем разработки малошумных конструкций автомобильных шин и улучшения акустического качества дорожных покрытий.

Ключевые слова: акустическое излучение, автотранспортное средство, шины, дорожное покрытие.

Investigation of level of acoustical radiation of system «tires of vehicle – road surface»

Vasilyev A.V.¹, Komlik E.A.²

¹Head of Department of Chemical Technology and Industrial Ecology

²Researcher

^{1,2} Samara State Technical University, Russia, Samara, Mologvardejskaya, 244

Abstract

Questions of research of noise of automobile transport in conditions of urban territories are considered. Analysis of acoustical emission created by tires of vehicles during the movement is carried out. Approaches to calculation of level of system «tires of vehicle – road surface» are considered. Program provision for estimation of tires noise during vehicle movement is described. Results of research are allowing to carry out efficient estimation of vehicle noise and to develop efficient measures of vehicle noise reduction.

Key words: acoustical radiation, vehicle, tires, road surface.

Введение

Проблема снижения шума, создаваемого автотранспортными средствами, становится всё более актуальной как в связи с возрастанием общего числа единиц автомобильного транспорта, так и ввиду качества дорожных покрытий [1-12]. В настоящее время резерв снижения шума за счет модернизации акустических показателей самого автомобиля в существенной степени исчерпан. Дальнейшее снижение шума автотранспортных средств в значительной мере будет связано с применением малошумных конструкций автомобильных шин и дорожных покрытий.

Шум, создаваемый шинами автомобиля при его движении, при скорости движения свыше 50 км/ч становится основным источником внешнего акустического излучения. В настоящее время программных средств по расчету уровня акустического

*E-mail: vasilyev.av@samgtu.ru (Vasilyev A.V.)

излучения системы «шины автотранспортного средства – дорожное покрытие», учитывающих комплекс данных, необходимых для расчета с достаточно высокой степенью точности, нет не только в России, но и в странах дальнего и ближнего зарубежья. Особенно актуальным расчетное и экспериментальное исследование уровня акустического излучения системы «шины автотранспортного средства – дорожное покрытие» является в условиях России, принимая во внимание высокую интенсивность автотранспортных потоков и качество дорожных покрытий.

Настоящая статья посвящена исследованию акустического излучения системы «шины автотранспортного средства – дорожное покрытие».

1. Анализ акустического излучения, создаваемого шинами автотранспортного средства при его движении

Основными источниками шума автотранспортного средства являются:

- силовая установка – двигатель (корпус двигателя, системы впуска и выпуска двигателя, процесс сгорания, кривошипно-шатунный механизм, шум механизма газораспределения);
- топливоподающая аппаратура;
- вентилятор системы охлаждения двигателя;
- трансмиссия (коробка передач и задний мост);
- шины (при движении);
- корпус автомобиля;
- вспомогательное оборудование.

Зависимость шума автомобилей от скорости движения и передачи носит сложный характер. При малых скоростях движения (менее 50 км/час) основным источником шума автомобиля является двигатель, а характеристики шума автомобилей в меньшей степени зависят от скорости движения. Наиболее шумные – грузовые автомобили с дизельным приводом большой (более 150 кВт) мощности. При скоростях движения свыше 50 км/ч наиболее интенсивным источником акустического излучения является шум, возникающий при взаимодействии шин автотранспортного средства с дорожным покрытием.

К источникам шума, создаваемого шинами автотранспортного средства, относятся: аэродинамический шум вращения колеса и шины, шум от вибрации поверхности шины и взаимодействия с дорожным покрытием, а также колебания давления в элементах протектора [1, 2, 7]. На уровень шума автомобильных шин влияют такие параметры, как рисунок протектора, конструкция шипов и ламелей, давление в шине, габаритные размеры, а также тип и состояние дорожного покрытия, по которому осуществляется движение.

Исследования влияния на шум геометрических параметров профиля шин позволили установить, что низкопрофильные шины, которые в настоящее время получают столь широкое распространение во многих странах, ведут за счет более широкого и менее короткого пятна контакта к некоторому увеличению уровней шума шин, взаимодействующих с дорогой.

На характеристики шума транспортных средств существенным образом также влияют состав и состояние дорожного покрытия. Так, бетонное покрытие на 2-3 дБА более шумно, чем асфальтовое. На влажном покрытии увеличение шума шин достигает 10 дБА, а в снегопад может снизиться на 3-5 дБА. Дорожное покрытие, изготовленное из материала с хорошими звукопоглощающими свойствами (например, с включением отходов резины), снижает шум шин на 2-4 дБА [8].

Автомобильные шины классифицируются по назначению, высоте профиля, габаритам, конструкции, условиям эксплуатации.

1. По назначению шины различаются для применения:
 - на легковых автомобилях;
 - на грузовых автомобилях малой грузоподъемности;
 - на микроавтобусах и прицепах к ним во всех климатических зонах при температуре окружающей среды от -45°C до $+55^{\circ}\text{C}$;
 - на грузовых автомобилях, прицепах, полуприцепах, автобусах, троллейбусах во всех климатических зонах при температуре окружающей среды до -45°C .
2. По высоте профиля шины классифицируются следующим образом:
 - шины обычного профиля с отношением высоты профиля (Н) к его ширине (В) более 0,89;
 - шины низкопрофильные – $H/B = 0,7-0,88$;
 - шины сверхнизкопрофильные – $H/B = < 0,7$.
3. По габаритам шины делятся на:
 - шины крупногабаритные с шириной профиля 350 мм (14 дюймов) и более, независимо от посадочного диаметра;
 - шины среднегабаритные с шириной профиля от 200 мм до 350 мм (от 7 до 14 дюймов) и посадочным диаметром не менее 457 мм (18 дюймов);
 - шины малогабаритные с шириной профиля не более 260 мм (до 10 дюймов) и посадочным диаметром не более 457 (18 дюймов).
4. По конструкции шины делятся на:
 - диагональные, у которых нити корда каркаса и брекера перекрещиваются в смежных слоях, а угол наклона нитей по середине беговой дорожки в каркасе и брекере от 45° до 60° ;
 - радиальные, (радиальные шины бывают со съемным протектором) у которых угол наклона нитей корда каркаса 0° , а брекера – не менее 65° . Эти шины имеют каркас с меньшим числом слоев корда, чем у диагональных, мощный брекер чаще металлокордный, что обеспечивает меньшие окружную деформацию шины при качении и проскальзывании протектора в контакте с дорожным покрытием и как следствие радиальные шины имеют меньшее теплообразование и потери на качение, большие сроки службы, максимальную нагрузку и допустимую скорость.

В настоящее время для легковых автомобилей в основном используются радиальные шины. Основными преимуществами радиальных шин являются меньшее сопротивление качению, лучшее сцепление с дорогой и значительно больший срок службы из-за малого изнашивания протектора, что достигается за счет работы пояса, охватывающего каркас, особенно если он изготовлен из металлокорда.

Таким образом, уровень акустического излучения, создаваемого шинами автотранспортного средства, зависит от комплекса эксплуатационных и конструктивных факторов и параметров: погодные условия, скорость движения автомобиля, состояние дорожного покрытия, условная ширина профиля, номинальное соотношение высоты профиля к ширине, посадочный диаметр, модель, вид рисунка протектора и др.

2. Расчет уровня звука системы «шины автотранспортного средства – дорожное покрытие»

Расчет уровня звука, возникающего при обтекании движущихся объектов потоком воздуха, сводится к решению задачи акустики, основанной на акустических аналогиях Лайтхилла. Расчет турбулентного потока жидкости, порождающего звук,

производится в сравнительно небольшом конечном объеме. Далее по турбулентному полю вычисляется возникающий от этого поля звук (шум).

Распространение волн в жидкостях и газах подчиняется нелинейным уравнениям аэрогидродинамики – уравнениям движения, неразрывности и состояния, точное решение которых представляет значительные трудности. Поэтому в акустике для описания звукового поля используют приближенные уравнения, которые получаются при линеаризации уравнений аэрогидродинамики, что возможно для большинства реальных звуковых процессов.

Используя общие методы решения неоднородного волнового уравнения для акустического давления в точке наблюдения на основе теории Лайтхилла и результатов исследования Керла, формула для расчета уровня акустического излучения имеет вид:

$$L = 20 \lg \left(\left(\frac{1}{4\pi} \cdot \int_S \frac{\partial}{\partial t} \cdot [\rho \cdot v_i \cdot n_i] \frac{dy}{r} - \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \int_S [(\rho \cdot v_i \cdot v_j + P \cdot \delta_{ij} + \right. \right. \\ \left. \left. + \mu \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right) \cdot v_j] \frac{dy}{r} + \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \cdot \int_{\Omega} [(P - C_0^2 \cdot \rho) \delta_{ij} + \right. \\ \left. \left. + \rho \cdot v_i \cdot v_j + \mu \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right) \right] \frac{dy}{r} \right) \frac{1}{P_0} \right) \quad (1)$$

где S – имеющаяся в потоке поверхность, м²; ρ – плотность невозмущенной среды, кг/м³; v – скорость движения, км/ч; r – расстояние между точкой наблюдения и точкой на поверхности Кирхгофа, м; P_0 – нулевой порог слышимости, Па ($P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па); C_0 – скорость звука, м/с; n_i – составляющая вектора нормали; $\delta_{i,j}$ – дельта Кронекера; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; P – звуковое давление, Па; Ω – пространственная область; v_i, v_j – составляющие вектора скорости.

На практике вычисление уровня звука системы «шины автотранспортного средства – дорожное покрытие» по формуле (1) затруднительно. Для достижения поставленной задачи примем следующие допущения:

- плоскость движения автотранспортного средства – горизонтальная;
- рассматриваются только аэродинамические источники звука.

Преобразуем выражение (1) к следующему виду:

$$L = 20 \lg \left(\left(\frac{1}{4\pi} \cdot \int_S \frac{\partial}{\partial t} \cdot [\rho \cdot v_i \cdot n_i] \frac{dy}{r} + \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \cdot \left(\frac{2\pi \cdot (P - C_0^2 \cdot \rho)}{r} \right) \right) \frac{1}{P_0} \right) = \\ = 20 \lg \left(\left(\frac{1}{4\pi} \cdot \int_S \left(\rho \cdot \frac{v}{t} \right) \frac{dy}{r} \right) \frac{1}{P_0} \right) = 20 \lg \left(\left(\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v}{r \cdot t} \right) \frac{1}{P_0} \right) = 20 \lg \left(\frac{0.08 \cdot \rho \cdot S \cdot v}{r \cdot t \cdot P_0} \right) \quad (2)$$

Связь уровня звука с физическими параметрами, воздействующими на объект движения, основано на преодолении сил сопротивления движения. При движении автомобиля энергия, подведенная к ведущим колесам, расходуется на преодоление сил сопротивления движению, к которым относятся: сила P_f сопротивления качению колес автомобиля по дороге, сила P_A сопротивления, возникающая при движении автомобиля на подъем, сила P_j сопротивления разгону автомобиля при движении ускоренно, сила P_W сопротивления воздуха, сила P_ϕ сцепления, противодействующая скольжению колес относительно дороги.

$$P_K = P_\phi + P_W + P_j + P_f + P_A \quad (3)$$

Подставим значения сил сопротивления, уравнение тягового баланса примет вид:

$$\frac{M_E i_K i_O \eta_M}{r_K} = \psi G_A + kfV^2 + \frac{G_A \delta i}{g} + G_A f + \varphi 2Z_{K2} \quad (4)$$

В случае движения автомобиля по инерции, силы сопротивления движению преодолеваются за счет накопленной в период разгона кинетической энергии.

В результате тождественных преобразований (2) получим:

$$L = 20 \lg \left(\frac{0.08 \cdot \rho \cdot S \cdot \sqrt{\frac{N_E \cdot 60 \cdot 735.5 \cdot i_K i_O \eta_M - \psi G_A - \frac{G_A \delta i}{g} - G_A f - \varphi 2Z_{K2}}{2\pi \cdot n}}}{kf} \right) \quad (5)$$

$$\frac{r \cdot t \cdot P_0}{r \cdot t \cdot P_0}$$

где i_K – передаточное число коробки передач; i_O – передаточное число главной передачи; η_M – механический к.п.д. трансмиссии; n – число оборотов двигателя, шт.; N_E – мощность двигателя, Вт; G_A – сила тяжести, м/с²; f – коэффициент сопротивления качению; K – коэффициент сопротивления воздуха; f – лобовая площадь автомобиля, м²; ψ – суммарный коэффициент сопротивления дороги; g – ускорение силы тяжести, м/с² ($g = 9,81$ м/с²); δ – коэффициент учета вращающихся масс; Z_{K2} – радиальная реакция ведущих колес; r_K – радиус качения колеса, м; φ – коэффициент сцепления шин ведущих колес автомобиля с дорогой.

3. Программное приложение для определения шума шин при движении автотранспортного средства

Результатом вышеизложенного математического описания и решения задачи акустики стало создание программного приложения, позволяющего определять уровень звукового давления, создаваемого при движении шинами транспортного средства, с учетом следующих факторов:

- скорость движения транспортного средства;
- характеристики дорожного покрытия;
- климатические характеристики (температура окружающей среды, осадки в виде дождя или снега и пр.);
- конструктивные характеристики шины транспортного средства;
- рисунка протектора автомобильной шины;
- габаритные размеры транспортного средства;
- масса транспортного средства;
- мощность двигателя;
- давление в шине;
- плотность среды внутри шины и т.д.

Внешний вид окна программного приложения для расчета внешнего шума шин при движении легкового автомобиля показан на рисунке 1. Сравнение

экспериментальных данных с расчетными показывает высокую точность разработанной модели. Погрешность расчета уровня звука с использованием программного приложения составляет не более 5 %.

Расчет уровня внешнего шума легкового автомобиля

24.09.2010 19:32:13

Климатические характеристики

Температура окружающей среды * 14 °C

Осадки ясно

Скоростные характеристики

Скорость движения автомобиля * 60 км/ч

Характеристики дорожного покрытия

Дорожное покрытие* асфальтобетонное

Конструктивные характеристики автомобиля

Снаряженная масса автомобиля* 1400 кг

Наибольшая высота автомобиля* 1,402 м

Наибольшая ширина автомобиля* 1,65 м

Мощность двигателя* 80 л.с.

Передаточное число главной передачи* 3,7

Конструктивные характеристики автомобильной шины

Ширина профиля * 175 мм

Серия * 70

Посадочный радиус * 13 дюйм

Рисунок протектора 1.bmp

Плотность среды внутри шины 1,293 кг/м³

Давление в шине 2 бар

Вычислить L = 69.28 дБА

Выбрать... Дальше Выход

Рис. 1. Внешний вид окна программного приложения для расчета внешнего шума шин при движении легкового автомобиля

Заключение

Предложенные методика расчета уровня звука системы «шины автотранспортного средства – дорожное покрытие» и программное приложение для определения шума шин при движении автотранспортного средства позволяют осуществлять эффективную оценку шума автотранспорта и разрабатывать эффективные мероприятия по его снижению путем разработки малозумных конструкций автомобильных шин и улучшения акустического качества дорожных покрытий.

Список литературы

1. Васильев А.В. Акустическая экология города: учеб. пособие для студентов вузов / А. В. Васильев; Федеральное агентство по образованию, Тольяттинский гос. ун-т. Тольятти, 2007 – 166 с.
2. Васильев А.В. Анализ шумовых характеристик селитебной территории г. Тольятти. Экология и промышленность России. 2005. № 4. С. 20-23.
3. Васильев А.В. Снижение шума транспортных потоков в условиях современного города. Экология и промышленность России. 2004. № 6. С. 37-41.
4. Васильев А.В. Мониторинг акустического загрязнения территории Самарской области. В сборнике: Защита населения от повышенного шумового

воздействия. Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под редакцией Иванова Н.И. 2014. С. 148-159.

5. Васильев А.В. Шумовая безопасность урбанизированных территорий. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1-1. С. 299-305.

6. Васильев А.В., Розенберг Г.С. Мониторинг акустического загрязнения селитебной территории г. Тольятти и оценка его влияния на здоровье населения. Безопасность в техносфере. 2007. № 3. С. 9-12.

7. Иванов Н.И., Никифоров А.С. Основы виброакустики: Учебник для вузов – СПб.: Политехника, 2000. – 482 с.: ил.

8. Комлик Е.А., Васильев А.В. Математическое описание и расчет шума системы "шины автотранспортного средства – дорожное покрытие". Известия Самарского научного центра РАН, г. Самара, 2010 г., т. 12, №1 (9), с. 2246-2250.

9. Luzzi S., Vassiliev A.V. A comparison of noise mapping methods in Italian and Russian experiences. В сборнике: Forum Acusticum Budapest 2005: 4th European Congress on Acoustic 2005. С. 1051-1056.

10. Luzzi S., Alfinito L., Vasilyev A. Action planning and technical solutions for urban vibrations monitoring and reduction. В сборнике: 39th International Congress on Noise Control Engineering 2010, INTER-NOISE 2010. С. 2508-2515.

11. Vassiliev A.V. Recent approaches to environmental noise monitoring and estimation of its influence to the health of inhabitants. В сборнике: 14th International Congress on Sound and Vibration 2007, ICSV 2007. С. 3242-3249.

12. Vasilyev A.V., Luzzi S. Recent approaches to road traffic noise monitoring. В сборнике: 8th European Conference on Noise Control 2009, EURONOISE 2009 – Proceedings of the Institute of Acoustics 2009.