

УДК 534.836.2:629.11

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И РАСЧЕТ ШУМА СИСТЕМЫ “ШИНЫ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА – ДОРОЖНОЕ ПОКРЫТИЕ”

© 2010 Е.А. Комлик, А.В. Васильев

Тольяттинский государственный университет

Поступила в редакцию 14.12.2010

Исследуются проблемы, связанные с моделированием и расчетом шума, создаваемого системой “шины автотранспортного средства – дорожное покрытие”. Приводится математическое описание процесса формирования звука при движении шин. Описаны особенности и результаты акустического расчета системы “шины автотранспортного средства – дорожное покрытие”.

Ключевые слова: автотранспортное средство, шум, шины, дорожное покрытие, математическое описание, расчет

1. ВВЕДЕНИЕ

Шум, возникающий при взаимодействии шин автотранспортного средства с дорожным покрытием при скорости движения свыше 50 км/ч, является наиболее интенсивным источником акустического излучения, в значительной степени определяющим общий уровень внешнего шума автотранспортного средства.

К источникам шума шин 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, 3]. 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.

В настоящее время резерв снижения шума за счет модернизации акустических показателей самого автомобиля в существенной степени исчерпан. В большей степени, дальнейшее снижение шума транспортных средств ожидается за счет применения малошумных конструкций автомобильных шин и дорожных покрытий. Эффект снижения шума транспортных средств за счет использования шумогасящих дорожных покрытий достигает 8 дБА на постоянных скоростях и 4 дБА в режиме разгона. Однако такие покрытия имеют ряд существенных недостатков. К ним относятся засорение пор, расслоение покрытия, приводящего к снижению шумопоглощающего эффекта на 1 дБА в год. Существуют и

другие технические и эксплуатационные проблемы, связанные с очисткой, ремонтом и заменой этих покрытий, высокие эксплуатационные издержки, а также плохое сцепление с мокрой поверхностью на новом пористом покрытии. Исследования покрытий, в основе которых имеются отходы шинной промышленности и переработанные использованные шины показали, что есть проблемы с сопротивлением качению и, следовательно, расходом топлива, а также с ухудшением экологической обстановки при строительстве дороги. Изменения конструктивных особенностей авторезины позволяют снизить общий уровень шума на 2-3 дБА.

В связи с этим актуальным является разработка математических моделей, методик и программного приложения по расчету шума, позволяющих как проектировать малошумные конструкции автомобильных шин, так и оценивать уровень акустического излучения системы “шины автотранспортного средства – дорожное покрытие”.

В настоящее время программных средств по расчету уровня шума системы “шины автотранспортного средства – дорожное покрытие”, учитывающих комплекс данных, необходимых для расчета шума с достаточно высокой степенью точности, нет не только в России, но и в странах дальнего и ближнего зарубежья. Особенно актуальным является расчет уровня шума системы “шины автотранспортного средства – дорожное покрытие” в условиях Российской Федерации, принимая во внимание высокую интенсивность автотранспортных потоков и качество дорожных покрытий.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЗВУКА ПРИ ДВИЖЕНИИ ШИН

Для решения задач аэродинамики шин широко используется модель полностью сжимаемо-

Евгений Александрович Комлик, аспирант кафедры “Механика и инженерная защита окружающей среды”. E-mail: ea_komlik@mail.ru

Андрей Витальевич Васильев, доктор технических наук, профессор, директор института химии и инженерной экологии. E-mail: avassil62@mail.ru

го газа [2], включающая:

- полные уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса);
- уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости);
- закон сохранения энергии, записанный через полную энтальпию;
- уравнение состояния идеального газа;
- k-ε-модель турбулентности.

Математическое описание процесса формирования звука, возникающего при обтекании движущегося объекта потоком воздуха, сводится к решению задач акустики. Решение данной задачи основано на акустических аналогиях Лайтхилла. Расчет турбулентного потока воздуха, порождающего звук, производится в сравнительно небольшом конечном объеме. Далее по турбулентному полю вычисляется возникающий от этого поля звук.

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 получают 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 расчета уровня звукового давления примет вид:

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

После интегрирования уравнения (1) имеем:

$$L = 20 \lg \left(\frac{0.08 \cdot \rho \cdot S \cdot \sqrt{v}}{r \cdot t \cdot P_0} \right)$$

- где S – имеющаяся в потоке поверхность;
 ρ – плотность невозмущенной среды;
 v – скорость движения;
 r – расстояние между точкой наблюдения и точкой на поверхности Кирхгофа;
 P_0 – нулевой порог слышимости ($P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па).
 t – время.

Связь расчетной формулы звукового давления с физическими процессами, 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. В случае движения автомобиля по инерции силы сопротивления движению преодолеваются за счет накопленной в период разгона кинетической энергии.

В результате тождественных преобразований уравнения (2) получим:

$$L = 20 \lg \left(\frac{0.08 \cdot \rho \cdot S \cdot \sqrt{\frac{N_E \cdot 60 \cdot 735.5 \cdot i_K i_O \eta_M - \psi G_A - \frac{G_A \delta}{g} - G_A f - \varphi 2Z_{K2}}{2\pi \cdot n}}}{r \cdot t \cdot P_0} \right)$$

где i_K – передаточное число коробки передач; i_O – передаточное число главной передачи; η_M – механический к. п. д. трансмиссии; n – число его оборотов двигателя; N_E – мощность двигателя; G_A – сила тяжести; f – коэффициент сопротивления качению; K – коэффициент сопротивления воздуха; f – лобовая площадь автомобиля; ψ – суммарный коэффициент сопротивления дороги; g – ускорение силы тяжести ($g = 9,81$ м/сек²); δ – коэффициент учета вращающихся масс; Z_{K2} – реакция радиальные реакции на каждое из задних колес.

3. АКУСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ “ШИНЫ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА – ДОРОЖНОЕ ПОКРЫТИЕ” И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Акустический расчет системы “шины автотранспортного средства – дорожное покрытие” осуществлялся с учетом следующих исходных данных:

- скорость движения автотранспортного средства;
- характеристики дорожного покрытия;
- климатические характеристики (температура окружающей среды, осадки в виде дождя или снега и пр.);
- конструктивные характеристики автотранспортного средства;
- конструктивные характеристики шины автотранспортного средства;
- рисунок протектора автомобильной шины;
- наличие/отсутствие шипов;
- габаритные размеры транспортного средства;

- масса транспортного средства;
- мощность двигателя и др.

Для проведения акустического расчета было разработано программное приложение, внешний вид окна которого показан на рис. 1. Разработанное программное приложение позволяет с высокой степенью точности определять уровень звука, создаваемого при движении шинами автотранспортного средства.

Для проверки точности результатов акустического расчета системы “шина автотранспортного средства – дорожное покрытие” и использованием разработанного программного приложения проведены экспериментальные исследования акустических характеристик шин для различных характеристик дорожных покрытий и режимов движения автомобиля. Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52800-2007 (ИСО 13325:2003) на технически исправном автомобиле по ГОСТ Р 51616-2000. Высота расположения микрофона 1,2 м от уровня дорожного покрытия. Расстояние от микрофона до оси движения автомобиля 7,5 м. В качестве зачетного значения измерений принимается среднее значение пяти замеров для каждой шины, при одинаковой скорости движения автомобиля.

Наружный шум автомобильной шины измерялся на испытательном участке дороги в режиме свободного качения шины, с выключенным двигателем, на нейтральной передаче и в режиме разгона. В качестве объекта эксперименталь-

ного исследования использовался переднеприводный автомобиль ВАЗ 21099 с бензиновым двигателем объемом 1,5 литра и 5-скоростной механической коробкой передач.

Результаты испытаний шума от контакта шин с дорожным покрытием, полученные в процессе проведения экспериментальных исследований, представлены в графическом виде на рис. 2.

Анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований уровня шума автомобильных шин, выполненный с использованием разработанного программного приложения, позволяет сделать следующие выводы:

- интенсивность шумоизлучения автомобильных шин практически не зависит от посадочного диаметра обода, от соотношения высоты профиля к ширине и от ширины профиля шины (так увеличение посадочного радиуса обода на 1 дюйм приводят к увеличению уровня звука на 0,25% (в диапазоне R13-R14); шины 70 серии приводят к увеличению уровня звука на 0,1%, по сравнению с шинами 65 серии, при прочих равных условиях (ширина профиля, посадочный диаметр обода, модель, нагрузка на колесо и т.д.); а увеличение ширины профиля на 5,5% приводит к росту уровня звука на 0,07%).
- при изменении характера рисунка протектора разница не превышает 1 – 2 дБА.
- изменение температуры окружающей среды, при прочих равных условиях (скорость, конструктивные характеристики автотранспор-

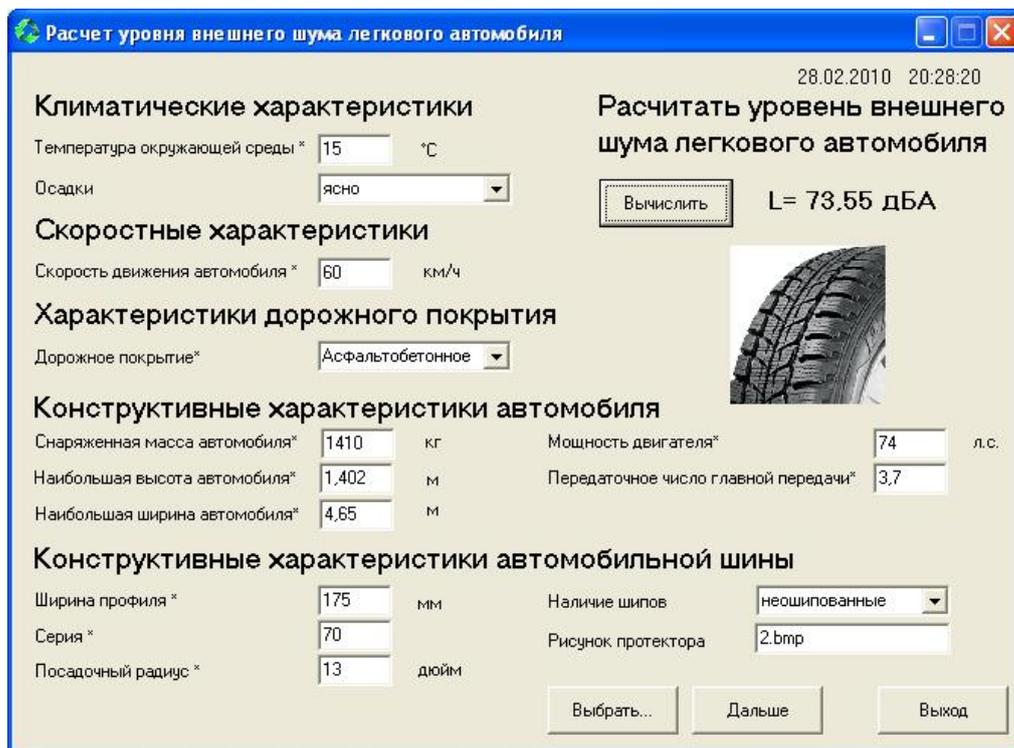


Рис. 1. Программное приложение для расчета шума системы “шина автотранспортного средства – дорожное покрытие”

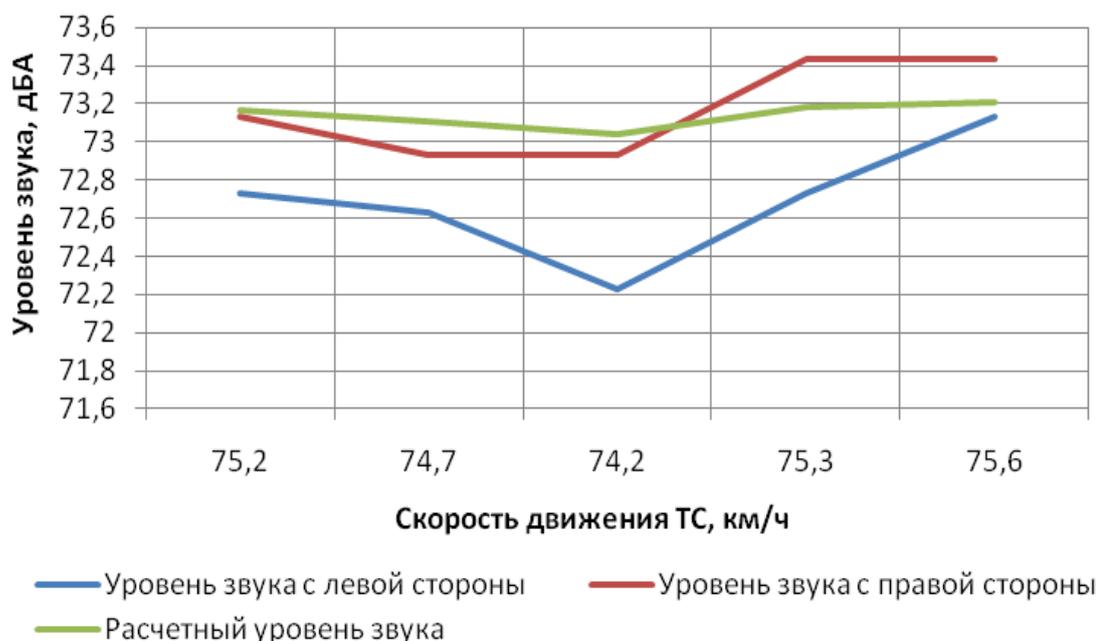


Рис. 2. Результаты экспериментальных и расчетных данных испытаний автомобильных шин на соответствие ГОСТ Р 52800-2007 (ИСО 13325:2003)

тного средства, характеристики автомобильной шины и т.д.) оказывает незначительное влияние на интенсивность шумоизлучения автотранспортного средства. Так каждое ее увеличение на 15 °С приводит к снижению уровня звука в среднем на 0,5 дБА.

- зависимость шума автомобилей от скорости движения носит сложный характер, так каждое удвоение скорости движения вызывает увеличение уровня звука на 6 - 7 дБА.

- на характеристики шума автотранспортного средства существенным образом влияют состав и состояние дорожного покрытия (так, грунтовое покрытие на 2,1 дБА более шумно, чем асфальтобетонное; а бетонное на 1,3 дБА менее шумно, чем грунтовое).

Сравнение экспериментальных данных с расчетными показывает высокую точность разработанной модели. Погрешность расчета уровня внешнего шума с использованием программного приложения составляет не более 3 %.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе исследованы проблемы, связанные с моделированием и расчетом шума, создаваемого системой “шины автотранспортного средства – дорожное покрытие”. Приводится математическое описание процесса формирования звука при движении шин. Описаны особенности и результаты акустического расчета системы “шины автотранспортного

средства – дорожное покрытие”. Сравнение экспериментальных данных с расчетными показывает высокую точность разработанной модели.

Разработанная и апробированная методика расчета шума системы “шины автотранспортного средства - дорожное покрытие” позволяет осуществлять эффективный поиск конструктивных решений при модернизации существующих и разработке новых малозумных образцов автомобильных шин, повышать качество автодорожных покрытий, значительно снижать материальные затраты и время на обработку изделий.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.1 “Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук” направления 1 федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.В., Шевченко Д.П. Моделирование, расчет и мониторинг шума транспортных потоков // Известия Самарского научного центра РАН. 2004. Т.6. №2. С. 399-407.
2. Варюхин А.Н., Ильин К.А., Коньшин В.Н., Рыжов С.А. Анализ акустического шума автомобильной шины при помощи программных комплексов LMS Virtual.Lab Acoustic, Abaqus и FlowVision // САПР и графика. 2005. №12.
3. Иванов Н.И., Никифоров А.С. Основы виброакустики: Учебник для вузов. СПб.: Политехника, 2000. 482 с.

**MATHEMATICAL DESCRIPTION AND CALCULATION OF NOISE OF THE SYSTEM
“VEHICLE’S TIRES – ROAD SURFACE”**

© 2010 E.A. Komlik, A.V. Vasilyev

Togliatti State University

Problems of modeling and calculations of noise of the system “vehicle’s tires – road surface” are investigated. Mathematical description of the process of forming of sound during tires movement is submitted. Peculiarities and results of acoustical calculation of system “vehicle’s tires – road surface” are described.
Key words: vehicle, noise, tires, road surface, mathematical description, calculation

*Eugene Komlik, Postgraduate of Department of Mechanics and Environmental Engineering. E-mail: ea_komlik@mail.ru
Andrey Vasilyev, Doctor of Technical Science, Professor, Director of the Institute of Chemistry and Environmental Engineering. E-mail: avassil62@mail.ru*