

УДК 629.331

ЧИСЛЕННАЯ АЭРОАКУСТИКА В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

Э.В. Рон / МГТУ им. Н.Э.Баумана

Аэродинамический шум является составной частью как внутреннего, так и внешнего шумового воздействия в автомобиле, усиливающий свое влияние с увеличением скорости. Для пассажирских автомобилей с хорошим взаимодействием между дорогой и транспортным средством он — главная причина шума при скоростях 130 км/ч и более. Причиной служат различные шумовые генераторы автомобиля такие, например, как открытые люки в крыше, передняя стойка, надколесная дуга и др.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ ШУМ В ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

В автомобилестроении аэроакустические источники подразделяются в зависимости от их эффекта на внутренний и внешний шумовые поля. В то время как нормативному регулированию подлежит только величина внешнего шума, внутреннее шумовое поле оказывает большое влияние на комфорт пассажиров.

Происхождение шума в автомобиле в основном является причиной работы двигателя, движения покрышек по дорожной поверхности и образования из-за этого аэродинамического шума. При малых скоростях движения шум двигателя оказывает наибольшее влияние на общее шумовое воздействие. Аэродинамический шум становится заметным только при движении с относительно большими скоростями [1].

В то время как шум работающего двигателя и шум от движения по дорожной поверхности были значительно уменьшены за последние несколько десятилетий, аэродинамический шум привлек к себе внимание только в конце 1990-х, несмотря на то, что его существенное влияние на комфорт пассажиров было выявлено еще раньше [2]. В 1983 году Добжински обнаружил, что аэродинамический шум является главной причиной звукового давления для пассажирского автомобиля средних габаритов при движении со скоростью 130 км/ч и более, а для некоторого спектра частот аэродинамический шум может доминировать даже при движении с меньшими скоростями.

ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА

Аэродинамический шум в автомобиле является причиной следующих действий:

- пульсации потока через открытые зоны;
- флуктуации давления на стенках твердых объектов;
- турбулентного напряжения сдвига.

Пульсация, вызывающая флуктуацию поля давления, может быть описана монопольным источником. Примерами таких источников могут служить утечки в системе уплотнения и выхлопная труба. Флуктуация давления на стену характеризуется дипольными источниками. Подобные виды шума наблюдаются когда, к примеру, турбулентный поток от бокового зеркала заднего вида сталкивается с боковым окном. Турбулентное напряжение сдвига возникает, например, из-за сдвига пограничного слоя позади автомобиля. Такие источники называются квадрупольными.

Интенсивность указанных трех типов шумовых источников изменяется в широких пределах и зависит от скорости потока v , плотности ρ , скорости звука c и, как следствие, числа Маха Ma .

Для монопольного источника

$$I_m \sim \frac{\rho}{c} v^4 = \rho \cdot Ma \cdot v^3. \quad (1)$$

Для дипольного источника

$$I_d \sim \frac{\rho}{c^3} v^6 = \rho \cdot Ma^3 \cdot v^3. \quad (2)$$

Для квадрупольного источника

$$I_q \sim \frac{\rho}{c^5} v^8 = \rho \cdot Ma^5 \cdot v^3. \quad (3)$$

Из уравнений (1)–(3) видно, что интенсивность монопольного источника подобна скорости потока в четвертой степени, в то время как интенсивность дипольного источника — в шестой. Таким образом, для автомобиля, как для тела, движущегося с относительно малыми скоростями ($Ma < 1$), монопольные источники оказывают наибольший эффект на возникновение шума. Самое слабое воздействие оказывается квадрупольными источниками, наличием которых в автомобильной аэроакустике можно пренебречь.

Для определения места возникновения и осуществления количественной оценки указанных источников используют акустическое зеркало с установленными в его фокусе микрофонами (рис. 1). Эти микрофоны способны одновременно отслеживать двухмерное распределение источников вдоль рабочей поверхности. Для оценки внутреннего шумового поля в салон автомобиля устанавливают акустические манекены (рис. 2), позволяющие получить корреляционные данные между внутренними и внешними значениями шумового воздействия. Данная корреляция просто необходима для корректной оптимизации формы транспортного средства с целью достижения наименьшего шума в салоне.

Частота возникающего шума зависит от характеристической длины выбранного объекта и скорости потока:

$$f = \frac{St \cdot v}{l}, \quad (4)$$

где l — характеристическая длина (высота или ширина) объекта исследования а St — число Струхала. Обычно для дополнительных шумовых генераторов в автомобиле число Струхала принимают равным единице.

ГЛАВНЫЕ ИСТОЧНИКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА В АВТОМОБИЛЕ

Негерметичность

Негерметичность конструкции становится причиной утечек, которые вызывают шум с относительно высоким уровнем звукового давления. При движении с высокими скоростями относительно высокий перепад давлений между наружной и внутренней зоной автомобиля только увеличивает вероятность возникновения утечек в герметизации конструкций. На рис. 3 показано влияние негерметичности конструкций на уровень звукового давления в салоне автомобиля без дополнительных генераторов шумового воздействия (зеркало заднего вида, антенна, стеклоочистители и др.) в сравнении с эффектом от самих генераторов. Существенное влияние герметичности явно заметно.



Рисунок 1. Акустическое зеркало с микрофонами при испытании в акустической трубе



Рисунок 2. Акустические манекены для определения шумового воздействия на уши водителя и пассажиров

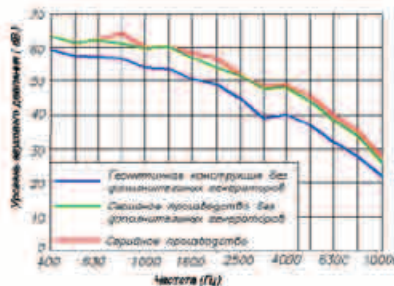


Рисунок 3.

Влияние некачественной герметизации на уровень звукового давления в салоне автомобиля по сравнению с влиянием дополнительных генераторов шумового воздействия [2]

Боковые зеркала заднего вида

Боковые зеркала заднего вида расположены в зонах с большой скоростью потока, тем самым они становятся источниками значительного шумового воздействия. Так как форма боковых зеркал во многом определяется их функциональностью, акустическая оптимизация может быть произведена в небольших масштабах. Зеркала заднего вида в основном генерируют тональный шум, подобный свисту. Во избежание его появления боковые зеркала заднего вида



Рисунок 4. Генераторы турбулентного потока на боковых зеркалах заднего вида

спереди оборудуют специальными генераторами турбулентного потока (рис. 4).

Стеклоочистители

В нерабочем состоянии стеклоочистители часто спрятаны за капот автомобиля. В противном случае, как, например, на современных минивэнах, они прямо противопоставлены набегающему потоку. Это ведет к повышенному уровню шумового давления и появлению особенно раздражающего шума в салоне автомобиля. Спойлеры для стеклоочистителей могут существенно уменьшить подобный эффект (рис. 5).

Антенны

Антенны являются источниками тонального шума, уменьшение которого может быть достигнуто путем установки антенны под наиболее возможным углом наклона или с помощью проволочной спирали вокруг антенны. Такие спирали препятствуют созданию вихрей фон Кармана позади антенны в диапазоне частот от 2500 до 3000 Гц. На рис. 6 показан эффект подобной спирали на внутренний шум при скорости 180 км/ч.

Передняя стойка

Форма передней стойки значительно влияет на аэродинамический шум. Она определяет размер и характер завихренностей потока за стойкой, которые в свою очередь могут повлиять на генерацию шума боковым зеркалом заднего вида. Вдобавок, каналы отвода дождевой воды, смонтированные на передней

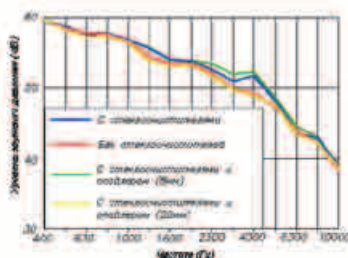


Рисунок 5. Влияние стеклоочистителей с и без спойлера на водителя; стеклоочистители в опущенной позиции [2]

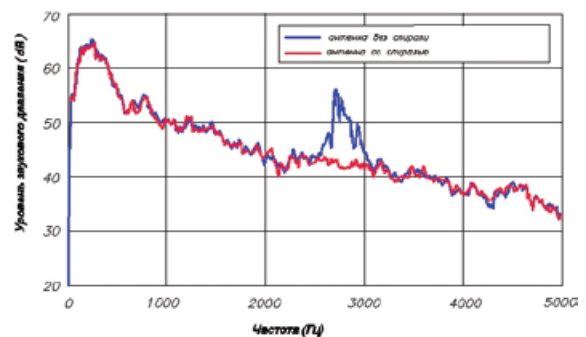


Рисунок 6. Уровень звукового давления на левое ухо водителя в зависимости от конструкции антенны

стойке, увеличивают шумовое воздействие. На рис. 7 видно, что при установке таких каналов в диагональном положении можно достичь значительной оптимизации уровня звукового давления.

Люк в крыше и другие источники резонанса в автомобиле

В автомобиле выделяют два вида источников резонанса: резонанс, который воздействует на всю кабину в целом, например, возникающий из-за открытого люка или окна, и резонанс в меньших по размеру отверстиях, такие как щели, выемки и др. При этом отверстия ведут себя как резонаторы Гельмгольца. Во время возникновения резонанса на передней грани отверстия происходит разделение вихрей, фронт давления преодолевает отверстие, что в свою очередь ведет к формированию нового разделения вихрей на передней грани.

Ввиду возникновения резонанса нестабильность потока происходит на скорости 40–90 км/ч. Нестабильность потока достигает уровня 130 дБ при частоте в 20 Гц, что значительно снижает комфортность транспортного средства. Неполное открытие люка и установка ветрозащитного экрана с выполненными на нем выемками могут уменьшить шумовое давление (рис. 8).

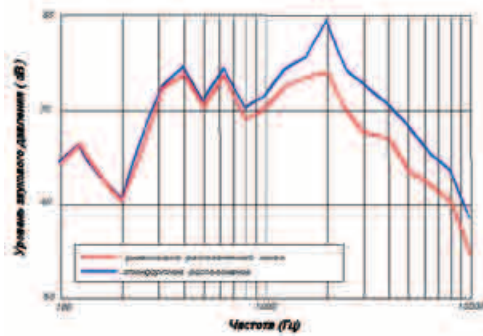


Рисунок 7. Влияние расположения каналов отвода дождевой воды на уровень звукового давления [2]

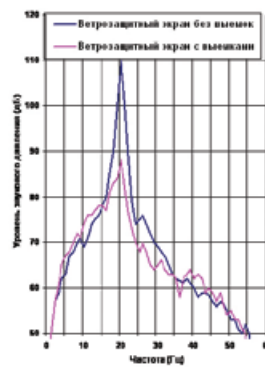


Рисунок 8. Шумовое давление в салоне автомобиля при скорости 80 км/ч при полном открытии люка с выемками на ветрозащитном экране и без них

Численные методы

Ввиду увеличения возможностей аппаратного обеспечения и, следовательно, возможностей численного решения доступных алгоритмов, числовые методы находят все большее применение в автомобилестроении, в том числе и в аэроакустической оптимизации. В то время как численные методы моделирования воздушного потока применяются в аэродинамической оптимизации автомобилей на протяжении уже более чем десяти лет, численная аэроакустическая оптимизация является относительно новым средством борьбы с шумовым воздействием. На данном этапе развития аэроакустическая оптимизация позволяет получить точные данные только для ряда хорошо отработанных сценариев. В общих же случаях, моделирование должно производиться с осторожностью в отношении начальных условий, учета зависимых параметров и интерпретации полученных результатов.

В автомобильной аэроакустике численное моделирование начало применяться в шумовой оптимизации следующих областей:

- люк в крыше и нестабильность потока на боковом стекле;
- боковые зеркала заднего вида;
- завихренности позади передней стойки;
- стеклоочистители;
- система вентиляции и кондиционирования.

Для численного аэроакустического моделирования был разработан ряд приближенных методов, позволяющих вычислять величину аэродинамического шума.

МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОЙ АЭРОАКУСТИКИ

Численные методы аэроакустики основываются на различных программных обеспечениях для численного моделирования течения газа. Последние позволяют рассчитать флуктуацию давления вдоль рабочей поверхности, а также флуктуацию потока позади автомобиля. Эти флуктуации являются источниками значительного шумового воздействия в автомобиле. При движении со скоростью до 200 км/ч флуктуация

давления вдоль рабочей поверхности оказывает наибольшее влияние. Физической основой численного моделирования течения газа являются, с одной стороны, уравнения Навье-Стокса, а с другой — метод решеточных уравнений Больцмана. Уравнения Навье-Стокса основываются на постоянстве массы, импульса и момента, а метод решеточных уравнений Больцмана — на моделировании частиц внутри решетки и на допущении о дискретности скоростей частиц.

Использование данных основ может позволить точно вычислить шумовые источники и смоделировать распространение звуковых волн в неоднородном потоке. Данный способ точного вычисления носит название прямого численного моделирования. Он дает возможность вычислить не только поле потока, но и относящиеся к нему аэроакустические волны. Однако жесткие требования к скорости обработки информации и аппаратному обеспечению делают применение указанного метода труднодоступным на данный момент. Все это привело к использованию гибридных методов, которое разделено на два процесса. В первом происходит вычисление поля потока на основе приближенного численного моделирования. А во втором процессе рассчитывается звуковое поле. Второй метод основан на так называемых аэроакустических аналогиях, в которых распространение звука в неоднородном поле не принимается во внимание.

АЭРОАКУСТИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ

Аэроакустические аналогии вытекают из уравнений Навье-Стокса. Правая часть этих уравнений описывает звуковые источники и, с одной стороны, состоит из флуктуации давления и скорости, а с другой — из тензора напряжения и силового члена.

Аналогия Лайтхилла основана на предположении, что флуктуация плотности ($\rho - \rho_0$) в турбулентной области должна вести себя подобно акустическим волнам.

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho - \rho_0) - a_0^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_i}(\rho - \rho_0) = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (5)$$

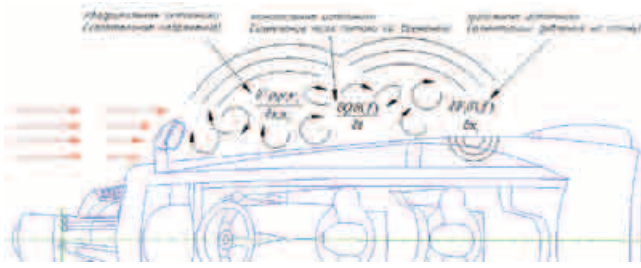


Рисунок 9. Пример регионов различных типов источников, созданных набегающим потоком за боковым зеркалом заднего вида

где a_0 — скорость звука в среде; T_{ij} — тензор турбулентных напряжений Лайтхилла, определяемый как:

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + [(p - p_0) - a_0^2(\rho - \rho_0)]\delta_{ij} - \tau_{ij}, \quad (6)$$

где τ_{ij} — тензор вязких напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера.

Для идеального газа при большом значении числа Рейнольдса и маленьких числах Маха, тензор Лайтхилла будет равен:

$$T_{ij} \cong \rho v_i v_j. \quad (7)$$

Аналогия Керла — это решение аналогии Лайтхилла, которое принимает во внимание наличие твердых границ, что позволяет учесть не только дифракцию шума на квадрупольный источник, но и возможность образования монопольных и дипольных источников вдоль рабочей поверхности.

$$p - p_0 = \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}(y, t - \frac{r}{a_0})}{r} dy - \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{P_i(y, t - \frac{r}{a_0})}{r} dS(y). \quad (8)$$

Здесь поверхностный интеграл — это модификация теории Лайтхилла, представляющая собой шумовое воздействие, созданное распределением дипольных источников силой P_i , отнесенной к единице площади.

$$P_i = -l_j p_{ij}, \quad (9)$$

где p_{ij} — тензор напряжения; l_j — косинус между направлением потока и внутренней нормалью к поверхности потока.

Аналогия Фокса Вильямса-Хокинга рассматривает распределение каждого в отдельности тип источников.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \right) (\rho - \rho_0) H(f) = \frac{\partial^2 (F_i H(f))}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial F_i \delta(f)}{\partial x_i} + \frac{\partial Q_i \delta(f)}{\partial t}, \quad (10)$$

где $F_i = p_{ij} \delta f / \delta x_j$, $Q = \rho_0 v_i \delta f / \delta x_i$, $H(f)$ — функция Хивисайда.

Первый член в правой части (10) описывает распределение квадрупольных источников, второй — дипольных, а третий — монопольных источников, обусловленных объемным смещением.

Видно, что использование данной аналогии позволяет получить наиболее удобное представление о каждом из шумовых источников. На рис. 9 представлен пример ее использования. Турбулентный

поток, созданный боковым зеркалом заднего вида, создает регионы квадрупольных источников и регионы дипольных источников в виде флуктуации давления. Вдобавок, появляется возможность возникновения монопольных источников, к примеру, из-за негерметичности конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникновение аэродинамического шума в транспортном средстве происходит из-за наличия в автомобиле негерметичности, а также различных генераторов шумового возбуждения. Выделяют монопольные, дипольные и квадрупольные шумовые источники. Их численное моделирование осуществляется на основе флуктуации потока. В случае прямого численного моделирования аэроакустические волны вычисляются в точности так, как и турбулентный поток, однако подобное допущение требует хороших компьютерных способностей. В случае же гибридного метода, когда численное моделирование сочетается с аэроакустическим процессом постпроектирования, в котором точное вычисление производится только для размерностей большого масштаба, а остальные размерности моделируются. Подобное моделирование осуществляется с помощью аэроакустических аналогий или линеализованных уравнений Эйлера. В этом случае точность полученных результатов во многом зависит от точности проведенного моделирования, особенно при вычислении абсолютных значений частот и величины звукового давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Goldstein M. E. Aeroacoustics. McGraw-Hill Book Company, New York, 1976.
2. Burgade L. Mise au point aéroacoustique des véhicules chez PSA. In: Tagungsband "Interactions mécanique entre fluides et structures". Colloques 6-2000, S. 16-21;
3. Ffowcs Williams, J.E.; Hawkins D.L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. Phil. Trans. Roy. Soc. 264(A) 321-342, London, 1969.
4. Curle N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. Proc. Roy. Soc. 231(A) P. 505-514, London, 1955.
5. Lighthill M. J. On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound. Proc. Roy. Soc. 222(A) P. 1-34, London, 1954.
6. Dorbzynski W. Zur Bedeutung von Stromungswechseldrucken auf der Karosserieoberfläche für den Innenlarm von Personenkraftfahrzeugen. Berlin Technische Universität, Dissertation, 1983.
7. Blumrich R. Berechnungsmethoden für die Aeroakustik von Fahrzeugen. Tagungsband der ATZ/MTZ-Konferenz Akustik 2006, Stuttgart, 17-18.5.2006.