

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВНЕШНЕГО ИНФРАЗВУКА НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Д.Т.Н. Нюнин Б.Н., Д.Т.Н. Графкина М.В., К.Т.Н. Свиридова Е.Ю.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

ecomami@mail.ru

Основной вклад в акустическое загрязнение селитебных территорий вносят наземные транспортные средства, в том числе и автомобили. Большинство научных публикаций посвящено исследованиям слышимого звука, его источников в автомобиле и разработке мероприятий по его снижению. По мнению авторов, в настоящее время недооценивается проблема возникновения и распространения инфразвука на жилых территориях, а соответственно, его негативное воздействие на человека и окружающую среду. Отсюда разработка расчетно-экспериментальных методов изучения механизма возникновения инфразвука от автомобиля является весьма актуальной проблемой. Значительная доля акустического излучения от автомобиля приходится на инфразвуковую и низкочастотную область частот. В зависимости от конструкции автомобиля, возникновение внутреннего инфразвука может быть обусловлено колебаниями двигателя как твердого тела на своей подвеске, изгибными и крутильными колебаниями кузова, воздействием набегающего потока воздуха. Были проведены измерения внутреннего и внешнего инфразвука. Предложена расчетная модель и проведена оценка влияния конструктивных особенностей автомобиля на уровень инфразвука. Расчетные исследования механизма возникновения внешнего инфразвука транспортного средства показали, что его частота и уровень зависят от скорости движения, коэффициента лобового сопротивления, длины и числа Струхалей. Существенным источником инфразвука в автомобиле также являются колеса, которые совершают вращательные и поступательные движения в набегающем потоке воздуха. Проведен расчет пяти колесных гармоник для легкового автомобиля при различных скоростях движения, выявлены существующие зависимости. Результаты расчета показали, что превышение нормативных значений инфразвука возможно только на селитебных территориях, прилегающих к транспортному потоку со скоростями движения свыше 80 км/ч. Таким образом, использование при конструировании автотранспортных средств выявленных зависимостей и рациональная организация дорожного движения позволит уменьшить уровни инфразвука и снизить негативное воздействие данного фактора на организм человека и окружающую среду.

Ключевые слова: наземные транспортные средства, инфразвук, моделирование, коэффициент лобового сопротивления, колесные гармоники, частота срыва вихрей, инфразвуковое давление, скорость движения.

Введение

Наземные транспортные средства (НТС) являются одним из основных источников шума и инфразвука на селитебных территориях. Внешнее звуковое поле автомобиля определяется следующими составляющими: двигатель, системы газообмена двигателя (система выпуска отработавших газов и система впуска воздуха для процесса сгорания топлива), агрегаты трансмиссии (коробка передач, мосты), шины при взаимодействии с дорожным покрытием, аэродинамический шум (взаимодействие кузова с потоком воздуха). В структуре аэродинамического шума и шуме от качения шин присутствует инфразвук.

Воздействие инфразвука и низкочастотного шума оказывает вредное влияние на человека.

Оно вызывает общебиологическое действие: головная боль, головокружение, нарушение функции вестибулярного аппарата, снижение внимания и работоспособности, появления чувства страха, общего недомогания [1, 2].

Большинство существующих научных работ посвящены исследованиям слышимого шума и разработке мероприятий по его снижению.

По мнению авторов, имеющих определенные наработки в данной области [3, 4], в настоящее время недооценивается проблема возникновения и распространения инфразвука на территории жилых застроек, а соответственно его негативное воздействие на жителей.

Проблема инфразвукового негативного воздействия не потеряет актуальности и при переходе на электромобили и исключении ос-

новного источника шума автомобиля – двигателя внутреннего сгорания, так как основным источником инфразвука является набегающей поток воздуха.

Цель исследования

Целью исследования является разработка расчетно-экспериментальных методов изучения механизма возникновения инфразвука от НТС.

Материалы, методы исследования и их обсуждение

Значительная доля акустического излучения от автомобиля приходится на инфразвуковую и низкочастотную область частот. В зависимости от конструкции автомобиля возникновение внутреннего инфразвука может быть обусловлено колебаниями двигателя как твердого тела на своей подвеске, изгибными и крутильными колебаниями кузова, воздействием набегающего потока воздуха.

Рассмотрим влияние упругости воздушно-го объема на уровень инфразвука в автомобиле. С этой целью были проведены измерения вибраций крыши, пола, уровня инфразвука и вертикального потока акустической мощности в салоне при полностью открытых и закрытых окнах, а также при разной степени открытия левой задней двери.

На рис. 1 приведены спектры инфразвука на заднем сиденье в салоне легкового автомобиля с открытыми и закрытыми окнами при движении со скоростью 60 км/ч. Нетрудно заметить, что открытие окон приводит к уменьшению уровня инфразвука на 8...10 дБ в диапазоне частот 9...13 Гц.

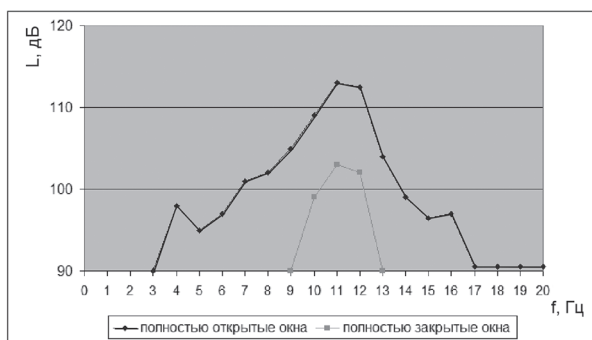


Рис. 1. Спектр шума в салоне автомобиля при движении со скоростью 60 км/ч

Однако в случае открытия полностью или частично только одного окна происходит обратная картина.

Открытие частично или полностью только одного окна приводит к увеличению уровня инфразвука от 2 дБ до 10 дБ в зависимости от степени открытия окна в диапазоне частот 2...20 Гц. Увеличение уровня инфразвука можно объяснить, рассмотрев кузов автомобиля в виде резонатора Гельмгольца.

Возбуждение инфразвука в салоне автомобиля может происходить (как в резонаторе Гельмгольца) вследствие пульсации давления в набегающем потоке воздуха открытого окна.

Были проведены расчеты резонансных частот для автомобиля при открытии окна левой задней двери на 1/10 долю площади, 1/2 долю и полностью открытом окне, которые показали, что собственная частота кузова как резонатора равна соответственно 7 Гц, 13 Гц, 18 Гц. Именно в области этих частот и происходит максимальное увеличение инфразвука при изменении степени открытия окна. Результаты вычисления функции когерентности между вертикальными колебаниями переднего колеса, пола, крыши и инфразвукового давления в салоне при полностью открытом окне также подтверждают предположение о возбуждении инфразвука в салоне набегающим потоком воздуха. Степень связи между этими колебательными процессами и инфразвуком уменьшилась при открытии окна от 1 до 0,4...0,6 в диапазоне частот 10...13 Гц. Такое уменьшение функции когерентности при открытии одного окна указывает на появление нового источника возбуждения, которым вероятнее всего является набегающий поток воздуха, пульсации давления в котором через открытое окно возбуждают инфразвуковые колебания (как в резонаторе Гельмгольца) в салоне автомобиля.

Для получения более полного представления об инфразвуке, создаваемом легковыми автомобилями, были проведены измерения внешнего шума. На рис. 2 приведены средние спектры внешнего шума в области частот 2...20 Гц автомобиля при скорости движения 100 и 120 км/ч. Ширина полосы анализа $F = 1$ Гц. Максимальный уровень инфразвука имеет место на частоте 2 Гц и равен 94...97 дБ в зависимости от скорости движения. С повышением частоты он падает от частоты 6 Гц примерно 7 дБ на октаву, а при дальнейшем повышении остается практически без изменения, на частотах 10...12 Гц уровень инфразвука равен ~85 дБ.

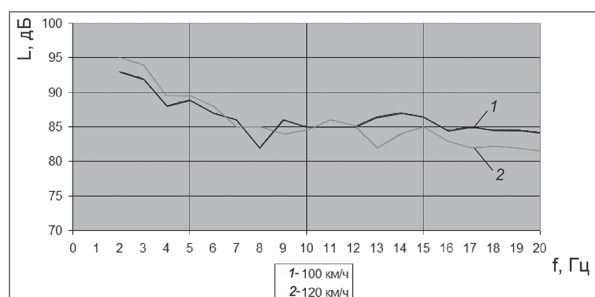


Рис. 2. Спектр внешнего шума автомобиля при движении

На рис. 3 произведено сравнение внутреннего и внешнего инфразвука легкового автомобиля при скорости движения 100 км/ч. В частотном диапазоне от 11 до 13 Гц разница между уровнем внутреннего и внешнего инфразвука составляет примерно 30 дБ (30 раз). Таким образом, механизм возникновения внутреннего и внешнего инфразвука в автомобиле различный.

Исследование на масштабной модели легкового автомобиля, проведенные ранее в институте механики МГУ, показали, что источником внешнего инфразвука в частотном диапазоне 1,7...28 Гц могут быть пульсации продольной компоненты скорости набегающего потока воздуха. Это приводит к образованию вихревого шума, связанного с периодическим срывом вихрей с обтекаемого тела, частота срыва вихрей и частота звука равны.

Аэродинамический шум делится на вихревой шум, шум вращения, шум от неоднородности потока, шум ударных волн, шум самовозбуждающихся газодинамических пульсаций.

Вихревой шум делится на шум периодически срывающихся вихрей, шум турбулентного обтекания, шум турбулентной струи. Вихревой шум – широкий класс аэродинамических шумов, связанных с вихреобразованием. Это вихреобразование может быть хаотичным или регулярным. В первом случае образуется турбулентный след, в котором происходят беспорядочные хаотичные пульсации воздуха, а во втором за обтекаемым телом образуется «дорожка Кармана», состоящая из крупных вихрей, расположенных в шахматном порядке.

Частота срыва вихрей и соответственно частота порождаемого им звука определяются с помощью соотношения Струхала:

$$f = S_h \cdot \frac{V}{D},$$

где S_h – число Струхала; V – скорость, м/с; D – характерный размер, м.

Постоянная S_h является критерием подобия при образовании вихревого шума. Впоследствии было установлено, что число Струхала может изменяться в некоторых пределах в зависимости от числа Re (число Рейнольдса).

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu},$$

где d – диаметр цилиндра, м; U – скорость потока, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Величина инфразвукового давления (P) может быть посчитана по формуле:

$$P = \frac{\rho}{c^3} \cdot (C_x \cdot Sh)^2 \cdot V^6 \cdot l^2, \quad (1)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления; l – длина цилиндра, м; c – скорость звука, м/с.

Теоретическое исследование влияния конструктивных особенностей автомобиля на уровень внешнего инфразвука проводилось на качественной модели – цилиндр в набегающем потоке воздуха. Размеры цилиндра соответствовали габаритным размерам автомобиля, а лобовое сопротивление соответствует лобовому сопротивлению автомобиля (C_x).

Скорость V_n набегающего потока воздуха равнялась скорости V_a автомобиля (рис. 3). При этом диаметр D цилиндра равняется высоте h кузова.

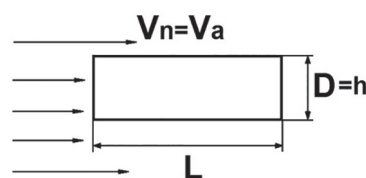


Рис. 3. Модель возникновения инфразвука

Для расчетной оценки уровня внешнего инфразвука были выбраны несколько различных типов автомобилей (автобус, грузовой автомобиль, малотоннажный грузовой автомобиль, легковой автомобиль, гибридный легковой автомобиль и микролитражный городской автомобиль). Для каждого автомобиля были проведены расчеты при скоростях движения 60, 80, 100 и 120 км/ч. В табл. 1 приведены характеристики автомобилей, для которых проводились расчеты.

Результаты расчета частоты срыва потока показали, что частотный диапазон внешнего инфразвука составляет от 1 до 5 Гц.

Таблица 1

Характеристики автомобилей

Автомобиль	Коэффициент лобового сопротивления C_x	Длина автомобиля l , м	Высота салона автомобиля h , м
Ikarus 250	0,71	12	3,2
КАМАЗ 5320	0,68	7,39	2,83
ГАЗ 33022	0,65	5,47	2,57
Renault Logan	0,36	4,29	1,53
Toyota Prius	0,26	4,46	1,5
Daewoo Matiz	0,39	3,49	1,48

Величина инфразвукового давления оценивалась по формуле (1), где $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; $c = 340 \text{ м/с}$ – скорость звука; $Sh = 0,2$; значения C_x и l выбирались по табл. 1 для каждого автомобиля.

Результаты расчета показали, что уровни инфразвука находятся в диапазоне от 65 до 135 дБ в зависимости от скорости и типа автомобиля. Максимальные уровни внешнего инфразвука имеют место при движении грузовых автомобилей и автобусов.

Минимальный уровень внешнего инфразвука создают автомобили *Toyota Prius* и *Daewoo Matiz*. Далее на расчетной модели была проведена оценка влияния конструктивных особенностей автомобиля на уровень инфразвука. Минимальную длину кузова имеет *Daewoo Matiz*, поэтому теоретическая оценка влияния длины на уровень инфразвука проводилась на автомобиле *Daewoo Matiz*. Длина кузова автомобиля менялась от 3,5 до 12 м.

На рис. 4 представлен график уровня инфразвука при различной длине автомобиля. Из графика видно, что при увеличении длины автомобиля в 2 раза уровень внешнего инфразвука увеличивается на 10 дБ, а при увеличении длины автомобиля до 12 м уровень внешнего инфразвука увеличивается на 22 дБ.

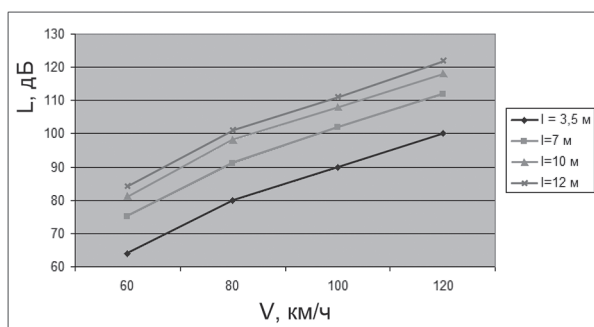


Рис. 4. Расчетный уровень инфразвука при различной длине автомобиля

Расчетная оценка влияния величины C_x на уровень инфразвука проводилась на автомобиле *Toyota Prius*, так как этот автомобиль имеет минимальный коэффициент лобового сопротивления $C_x = 0,26$.

На рис. 5 представлен график изменения уровня внешнего инфразвука при различном коэффициенте лобового сопротивления. При изменении C_x от 0,26 до 1 уровень инфразвука возрастает на 35 дБ.

На рис. 6 представлен график зависимости уровня инфразвука от числа Sh Струхала.

Таким образом, результаты расчета показали существенную зависимость уровня внешнего инфразвукового давления от конструктивных особенностей кузова или кабины автомобиля.

Существенным источником инфразвука в автомобиле также являются колеса, которые совершают вращательные и поступательные движения в набегающем потоке воздуха.

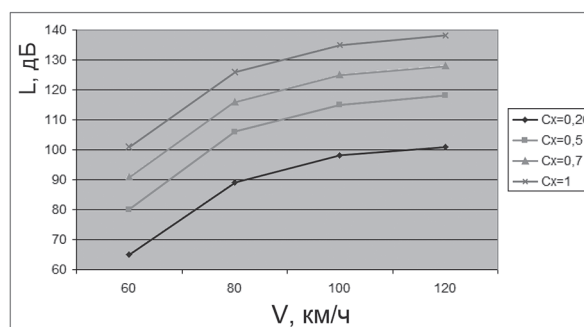


Рис. 5. Расчетный уровень внешнего инфразвука при различных коэффициентах лобового сопротивления

При малых и средних скоростях движения автомобиля первая колесная гармоника $f_{\text{кол}}$ проявляется, как правило, в инфразвуковом диапазоне спектра шума (ниже 20 Гц); только при высоких скоростях движения современных

легковых автомобилей (115...120 км/ч) эта гармоника начинает прослушиваться в звуковом диапазоне частот. Как правило, она имеет наибольший уровень интенсивности и на отдельных скоростных режимах может обуславливать высокий уровень внешнего и внутреннего инфразвука.

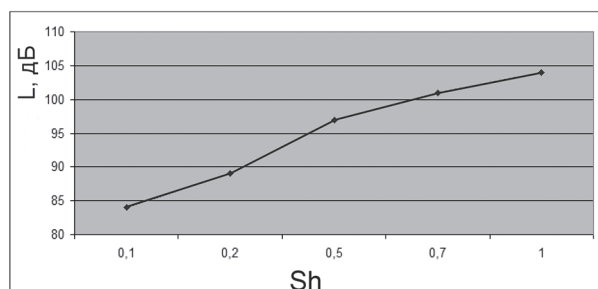


Рис. 6. Расчетная зависимость уровня инфразвука от числа Струхала

Частота колесной гармоники в спектрах вибрации агрегатов и шума в кузове:

$$f = k V_a / 22,6 R_{\text{дин}},$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ – числовой ряд; V_a – скорость автомобиля, м/с; $R_{\text{дин}}$ – динамический радиус качения шины, м.

Проведен расчет пяти колесных гармоник для колеса от $R = 13$ дюймов легкового автомобиля при скорости движения 80, 100 и 120 км/ч. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

При скоростях 80...120 км/ч частоты колесных гармоник находятся в диапазоне от 20...170 Гц. При увеличении радиуса колеса частоты колесных гармоник будут снижаться, особенно для грузовых автомобилей и автобусов.

В транспортном потоке спектр колесных гармоник будет перекрывать низкочастотный и инфразвуковой диапазон.

Расчетные исследования механизма возникновения внешнего инфразвука транспортного средства показали, что его частота и уровень зависят от скорости движения, коэффициента лобового сопротивления, длины и высоты кузова.

Важно отметить, что превышение инфразвуком нормативных значений [5] может быть только на селитебных территориях, прилегающих к транспортному потоку со скоростями движения свыше 80 км/ч. Таким образом, рациональная организация дорожного движения позволит уменьшить уровни инфразвука и снизить негативное воздействие данного фактора на организм человека и окружающую среду.

Дальнейшее изучение механизма возникновения инфразвука от наземных транспортных средств позволит разработать эффективные средства снижения инфразвука от НТС, например, резонансные поглотители и устройства активного глушения шума.

Выводы

Источником внешнего инфразвука НТС в частотном диапазоне 1,7...28 Гц могут быть пульсации продольной компоненты скорости набегающего потока воздуха.

Образование инфразвука НТС связано с периодическим срывом вихрей с обтекаемого тела, частота срыва вихрей и частота звука равны.

Частотный диапазон внешнего инфразвука зависит от скорости движения и типа автомобиля и находится в диапазоне от 1 до 5 Гц.

Максимальные уровни внешнего инфразвука имеют место при движении грузовых автомобилей и автобусов, а минимальные – микролитражные легковые автомобили.

Результаты расчета показали, что превышение нормативных значений инфразвука возможно только на селитебных территориях, прилегающих к транспортному потоку со скоростями движения свыше 80 км/ч.

При увеличении длины автомобиля в 2 раза уровень внешнего инфразвука возрастает на 10 дБ, а при увеличении длины в 4 раза – на 22 дБ.

При изменении коэффициента лобового сопротивления от 0,26 до 1 уровень инфразвука возрастает на 35 дБ. С увеличением числа Струхала уровень инфразвука возрастает.

Таблица 2

Расчеты частоты колесных гармоник

V , км/ч	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f_4 , Гц	f_5 , Гц
80	22	45	67	90	112
100	28	56	84	112	141
120	33	67	101	135	169

При малых и средних скоростях движения автомобиля первая колесная гармоника проявляется, как правило, в инфразвуковом диапазоне спектра шума (ниже 20 Гц).

Расчетные исследования механизма возникновения внешнего инфразвука транспортного средства показали, что его частота и уровень зависят от скорости движения, коэффициента лобового сопротивления, длины и значения числа Струхала.

Литература

1. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Драган С.П., Ахметзянов И.М. Кумулятивные медико-экологические эффекты сочетанного действия шума и инфразвука // *Экология и промышленность России*. 2012. № 3. С. 46–49.
2. Михайлов Д.В., Болдырев Д.А. Воздействие инфразвука на человека // *Научные труды SWorld*. 2011. Т. 5. № 3. С. 39–40.
3. Графкина М.В., Нюнин Б.Н., Свиридова Е.Ю. Теоретическое обоснование экологического мониторинга энергетического низкочастотного техногенного воздействия // *Экология урбанизированных территорий*. 2014. № 3. С. 66–69.
4. Графкина М.В., Нюнин Б.Н., Свиридова Е.Ю., Теряева Е.П. Развитие системы экологического мониторинга электромагнитных и инфразвуковых низкочастотных полей на застроенных территориях // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2012. № 4(4). С. 70–76.
5. Санитарные правила и нормы 2.2.4./2.1.8.10-35-2002. Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200029239> (Дата обращения 01.12.2017 г.).

References

1. Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Dragan S.P., Akhmetzyanov I.M. Cumulative medico-ecological effects of the combined effect of noise and infrasound. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2012. No 3, pp. 46–49 (in Russ.).
2. Mikhaylov D.V., Boldyrev D.A. The impact of infrasound on man. *Nauchnye trudy SWorld*. 2011. Vol. 5. No 3, pp. 39–40 (in Russ.).
3. Grafkina M.V., Nyunin B.N., Sviridova E.Yu. Theoretical justification for the ecological monitoring of low-frequency power generation technogenic impact. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. 2014. No 3, pp. 66–69 (in Russ.).
4. Grafkina M.V., Nyunin B.N., Sviridova E.Yu., Teryaeva E.P. Development of a system of environmental monitoring of electromagnetic and infrasonic low-frequency fields in built-up areas. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2012. No 4(4), pp. 70–76 (in Russ.).
5. Sanitary rules and regulations 2.2.4./2.1.8.10-35-2002. Infrasound in workplaces, in residential and public buildings (in Russ.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200029239> (accessed: 01.12.2017).

MODELING OF THE MECHANISM OF APPEARANCE OF EXTERNAL INFRASOUND OF LAND VEHICLES

Dr.Eng. **B.N. Nyunin**, Dr.Eng. **M.V. Grafkina**, Ph.D. **E.Yu. Sviridova**

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

ecomami@mail.ru

The main contribution to the acoustic pollution of residential areas is made by land vehicles including automobiles. Most scientific publications are devoted to the study of audible sound, its sources in the vehicle and the development of measures to reduce it. According to the authors opinion, at present the problem of the emergence and spread of infrasound in residential areas, and, accordingly, its negative impact on people and the environment is underestimated. Hence the development of computational and experimental methods for studying the mechanism of the appearance of infrasound from a vehicle is a very urgent problem. A large proportion of the acoustic radiation from the vehicle falls on infrasound and low-frequency range of frequencies. Depending on the design of the automobile, the occurrence of internal infrasound can be caused by the engine's vibrations as a rigid body on its suspension, flexural and torsional body oscillations, the impact of the oncoming airflow. Measurements of internal and external infrasound were carried out. A computational model is proposed and an assessment is made of the influence of the design features of the vehicle on the level of infrasound. Calculation studies of the mechanism of the appearance of an external infrasound of a vehicle have shown that its frequency and level depend on the speed of movement, the drag coefficient, the length and the Strouhal number. A significant source of infrasound in the automobile are also wheels that perform rotational and translational movements in the oncoming air stream. Calculation of five wheel harmonics for a automobile at various speeds of movement is carried out, existing dependences are revealed. The results of the calculation showed that exceeding the normative values of infrasound is possible only in residential areas adjacent to the traffic flow with speeds of over 80 km/h.

Keywords: ground vehicles, infrasound, simulation, drag coefficient, wheel harmonics, vortex shedding frequency, infrasound pressure, speed of movement.