

УДК 534.23; 534.4

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОПЛЕРОВСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ПРИЕМЕ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА АВТОМОБИЛЯ

С.Р. ГЕЙСТЕР, А.М. ГЛАДЫШЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Научно-производственное унитарное предприятие "Тетраздр"  
Платонова, 22а, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 21 декабря 2009*

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований влияния эффекта Доплера на спектрально-временные характеристики акустических сигналов (АС) автотранспортных средств (АТРС) различных классов на примерах автобуса МАЗ и мопеда в движении. Рассматриваются подтверждаемые экспериментальными результатами принципы измерения скорости АТРС по излучаемым акустическим сигналам на основе эффекта Доплера.

*Ключевые слова:* акустический сигнал, автомобиль, двигатель, эффект Доплера.

### Введение

Движущееся АТРС создает в окружающем пространстве волновое поле, структура и параметры которого в точке приема зависят от положения, скорости движения и других характеристик АТРС. Такое поле может рассматриваться как пространственно-временной сигнал [1]. Поэтому АС, создаваемый движущимся АТРС, несет в себе информацию о скорости движения АТРС, и может быть использован для ее определения. Известно [2], что в спектре АС АТРС имеются составляющие, кратные частоте выхлопов  $f_{vh}$ , которая связана с частотой вращения коленчатого вала двигателя АТРС следующим образом [3]:

$$f_{vh} = 2f_{kv}N_{cl}/I, \quad (1)$$

где  $N_{cl}$  — число цилиндров в двигателе;  $I$  — число тактов в двигателе;  $f_{kv}$  — частота вращения коленчатого вала двигателя.

Частота АС, представляющего собой периодическую последовательность акустических импульсов с частотой повторения  $f_{vh-0}$ , на входе акустического приемника при движении АТРС вследствие эффекта Доплера изменяется следующим образом [4]:

$$\begin{cases} f_{vh-pr} = f_{vh-0} \frac{c}{c - |v_a|}, & \text{при приближении АТРС} \\ f_{vh-ud} = f_{vh-0} \frac{c}{c + |v_a|}, & \text{при удалении АТРС} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость звука в воздухе, м/с;  $f_{vh-pr}(f_{vh-ud})$  — частота в спектре АС, действующего на входе акустического приемного устройства при приближении (удалении) АТРС к (от) акустическому приемному устройству, Гц;  $v_a$  — скорость АТРС, м/с.

Решив систему уравнений (2), найдем выражение для скорости движения АТрС  $v_a$  и истинного значения частоты выхлопов  $f_{vh-0}$ :

$$|v_a| = \frac{c \cdot f_{vh-pr} - f_{vh-ud}}{f_{vh-pr} + f_{vh-ud}}; \quad (3)$$

$$f_{vh-0} = \frac{2f_{vh-pr}f_{vh-ud}}{f_{vh-pr} + f_{vh-ud}}. \quad (4)$$

Таким образом, процедуру определения скорости АТрС можно свести к измерению частот повторения АС выхлопов АТрС на входе акустического приемника.

Заметим, что в качестве частоты  $f_{vh-pr}(f_{vh-ud})$  можно использовать как саму частоту АС выхлопов АТрС, так и ее гармоники  $nf_{vh-pr}(nf_{vh-ud})$ , где  $n$  — номер гармоники.

### Характеристика оборудования и условия проведения эксперимента

Для оценки возможности определения скорости АТрС по излучаемому АС проведены эксперименты по записи АС с последующей их обработкой. Записи АС АТрС производились с помощью микрофона производства фирмы "Verbatim". Микрофон устанавливался на обочине прямолинейного участка дороги и закреплялся на треноге на высоте около 40 см. Сигнал с микрофона подавался на звуковую карточку Creative Sound Blaster Audigy 2 ZS Notebook. Принятый АС в виде дискретных отсчетов, сформированных с частотой дискретизации 96 кГц и представленных двоичными 24-разрядными числами, записывался на жесткий диск в формате РСМ (без сжатия). Для уменьшения влияния ветра микрофон был обернут в ворсистую плотную ткань.

Эксперименты проводились в примерно одинаковых условиях: температура воздуха 4–6°C; относительная влажность воздуха около 80–100%; скорость ветра до 3 м/с; облачность сплошная и низкая. Схема проведения эксперимента и фотографии места проведения эксперимента с установленным оборудованием представлены на рис. 1.

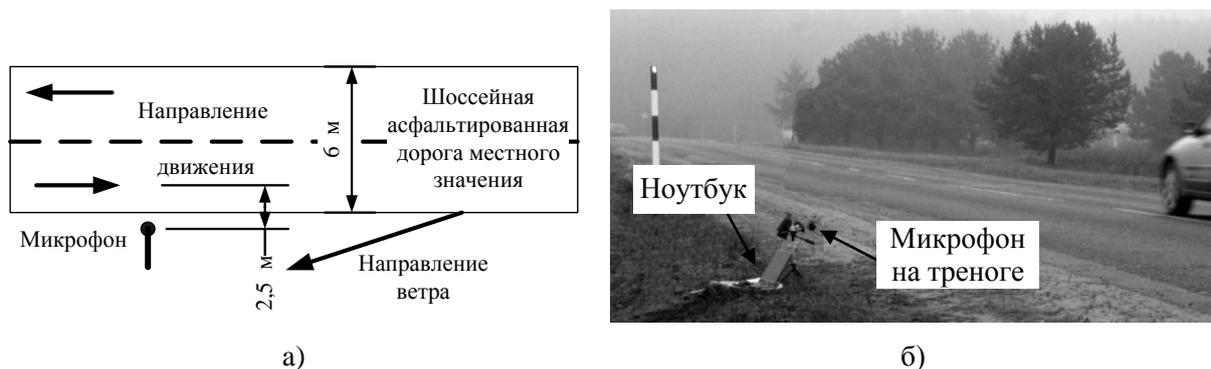


Рис. 1. Методика эксперимента:  
а — схема проведения; б — место проведения и расположение оборудования

Обработка записанных АС осуществлялась в среде Matlab и состояла в формировании оценок энергетического спектра (ЭС) и спектрограммы — зависимости ЭС от времени.

Формирование оценок ЭС сигнала осуществлялось путем возведения в квадрат результата прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ) от совокупности временных отсчетов  $p_i, i = \overline{1, N}$ , длиной  $N=48000$  отсчетов (эквивалентное время когерентного накопления 0,5 с), которая для более точного определения положения максимумов в спектре [5] дополнялась нулями до временного интервала 1 с. Сформированный ЭС нормировался относительно своего максимального значения.

Формирование спектрограммы осуществлялось путем вычисления ЭС для последовательности фрагментов временной реализации, включающих по  $N=14400$  (эквивалентное время

когерентного накопления 0,15 с) дискретных отсчетов сигнала давления  $p_i, i = \overline{1, N}$ . Для улучшения отображения динамики изменения ЭС осуществлялось перекрытие соседних фрагментов на  $N=9600$  отсчетов (0,1 с) или на 67% от длины фрагмента.

### Результаты экспериментальных исследований характеристик АС

Исследовался автобус МАЗ, имеющий 6-цилиндровый 4-тактный двигатель типа ММЗ Д260.5, и мопед, имеющий 1-цилиндровый 2-тактный двигатель.

**Результаты исследований акустического сигнала автобуса МАЗ.** Временная реализация АС  $p(t)$  автобуса МАЗ в относительных единицах (о.е.) и соответствующая ей спектрограмма, а также фрагменты временной реализации АС в передней и задней полусферах и соответствующие им ЭС приведены на рис. 2 и 3 соответственно. По спектрограмме рис. 2,а можно сделать вывод о том, что ЭС АС имеет характерные частотные составляющие, которые синхронно изменяются во времени и соответствуют 1, 3, 4 и 5 гармоникам частоты выхлопов. На временном интервале 2–3 с происходит уменьшение частоты выхлопов  $f_{vh-0}$  от значения  $f_{vh-pr}$  до значения  $f_{vh-ud}$ , и на этом же временном промежутке амплитуда АС на временной реализации рис. 2,а достигает максимума.

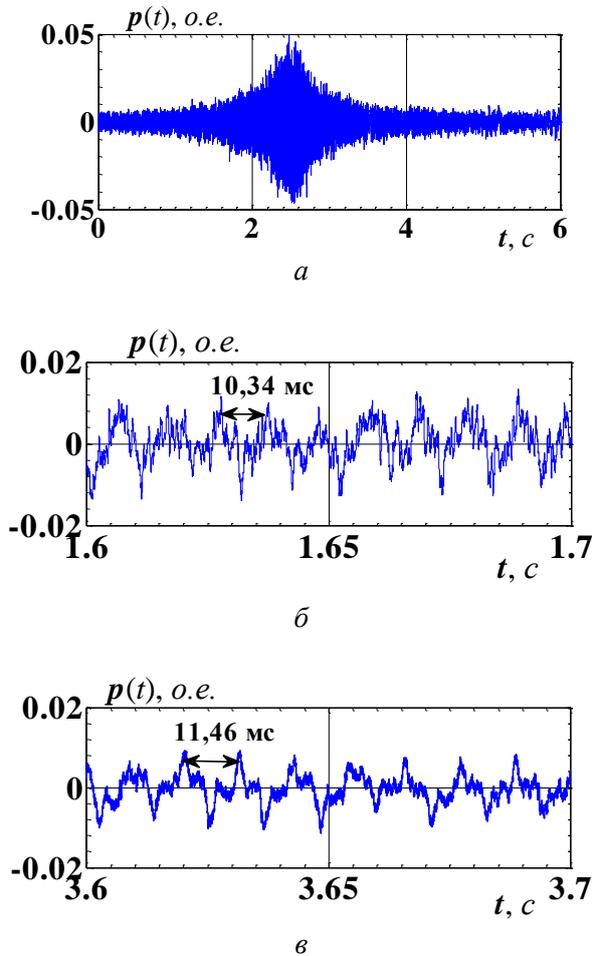


Рис. 2. Временные реализации АС автобуса МАЗ: а — общий вид; б — при приближении; в — при удалении

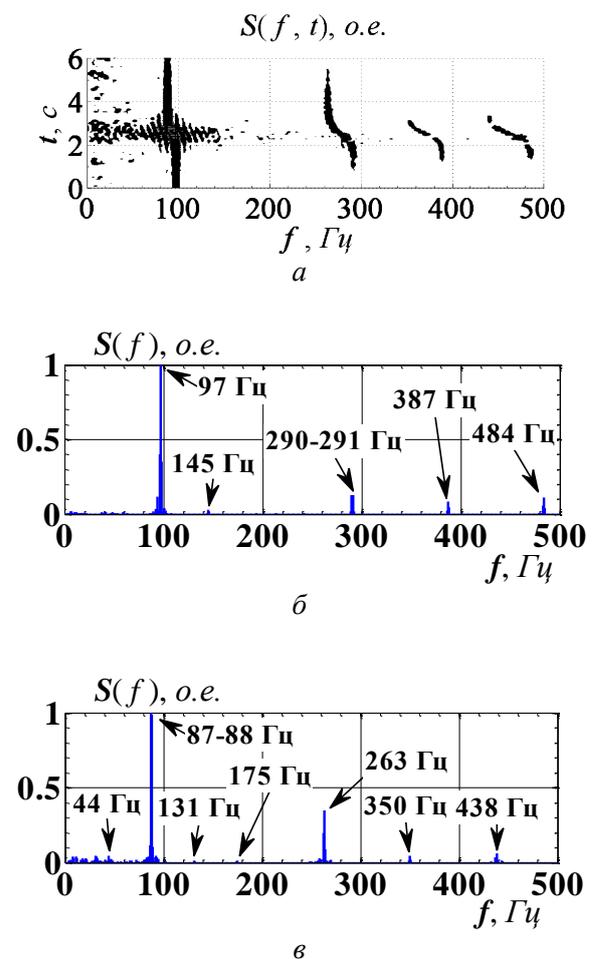


Рис. 3. Спектральные характеристики АС автобуса МАЗ: а — спектрограмма; б — ЭС при приближении; в — ЭС при удалении

Периоду повторения 10,34 мс АС от приближающегося автобуса на рис. 2,б соответствует частота 96,71 Гц первой гармоники частоты выхлопов в ЭС рис. 3,б, который получен для временного интервала 1,3–1,8 с. Периоду повторения 11,46 мс АС от удаляющегося автобуса на рис. 2,в соответствует частота 87,3 Гц первой гармоники частоты выхлопов в ЭС рис. 3,в,

который получен для временного интервала 3,4–3,9 с. Временные реализации АС в передней (рис. 2,б) и задней (рис. 2,в) полусферах показывают четкую периодичность АС автобуса в обеих полусферах. Кроме этого, в ЭС АС в обеих полусферах вторая гармоника частоты выхлопов имеет очень малое значение.

В соответствии с формулой (1) частота вращения коленчатого вала двигателя автобуса будет равна  $f_{kv}=If_{vh-0}/2N_{cl}=4 \times 92/2 \times 6=30,67$  Гц или 1840 об/мин. Здесь истинное значение частоты выхлопов определялось по формуле (4). Такое значение частоты вращения коленчатого вала двигателя  $f_{kv}$ , работающего в установившемся режиме, хорошо согласуется с данными других авторов — например, в [6] указана наиболее вероятная частота вращения коленчатого вала в установившемся режиме, равная 1850 об/мин.

Результаты вычислений скорости автобуса, выполненные в соответствии с (3), для всех наблюдаемых спектральных компонент приведены в табл. 1. При этом использовано значение скорости звука, равное 334 м/с, соответствующее температуре воздуха 4–6°C [7]. В случае, когда сигнал гармоники распределен в нескольких фильтрах и энергия спектральных составляющих в соседних фильтрах примерно одинакова, то частоту гармоники принимали равной среднему арифметическому значению от резонансных частот фильтров с сигналом.

Таблица 1. Результаты вычисления скорости автобуса для всех спектральных компонент

Наименование параметра	Номер гармоники			
	1	3	4	5
$f_{vh-pr}$ , Гц	97	290,5	387	484
$f_{vh-zd}$ , Гц	87,5	263	350	438
$v_{av}$ , м/с (км/ч)	17,2 (61,9)	16,6 (59,7)	16,8 (60,4)	16,7 (60)

Результаты эксперимента показали, что значения скорости автобуса, вычисленные по разным гармоникам, хорошо соответствуют друг другу. При этом очевидно, что лучшую точность дает вычисление скорости по гармоникам с максимальной частотой.

**Результаты исследований акустического сигнала мопеда.** Временная реализация АС  $p(t)$  мопеда в относительных единицах (о.е.) и соответствующая ей спектрограмма, а также фрагменты временной реализации в передней и задней полусферах и соответствующие им ЭС приведены на рис. 4 и 5 соответственно. В целях лучшего отображения временной реализации, исходный АС был отфильтрован, а затем восстановлен при помощи обратного ДПФ. Фильтрация была проведена с помощью прямого ДПФ путем обнуления значений сигналов во всех фильтрах ДПФ, резонансные частоты которых выше 700 Гц. Верхняя частота спектра, равная 700 Гц, была выбрана исходя из того, что определение скорости АТрС осуществляется по низкочастотным (частота выхлопов и ее первые гармоники) составляющим спектра.

Время проезда мопедом мимо микрофона, соответствующее максимуму сигнала, на временном графике рис. 4,а имеет значение 25,8 с. Несимметричность по амплитуде временной реализации АС мопеда относительно времени проезда мимо микрофона (рис. 4,а) явно выражена и объясняется наличием глушителя, снижающего АС в передней полусфере.

По спектрограмме рис. 5,а видно, что как и в случае с автобусом МАЗ, ЭС АС имеет характерные частотные составляющие, которые синхронно изменяются во времени, и соответствуют 2–7, 9, 10 и 11 гармоникам частоты выхлопов на входе акустического приемника. Интерес представляет фактическое отсутствие первой гармоники частоты выхлопов. Поскольку мопед имеет 2-тактный 1-цилиндровый двигатель, то в соответствии с (1) частота выхлопов для него равна частоте вращения коленчатого вала двигателя:  $f_{kv}=f_{vh-0}$ .

В силу конструктивных особенностей мопеда (открытый двигатель, менее эффективный глушитель) в спектре АС мопеда присутствуют более высокочастотные составляющие, чем в спектре автобуса. Кроме того, в отличие от ЭС автобуса, в котором максимум ЭС четко выражен и приходится на первую гармонику частоты выхлопов, максимум ЭС мопеда не настолько четко выражен, и меняет свое положение по оси частот в зависимости от полусферы. В передней полусфере (рис. 5,б) максимум ЭС приходится на 10-ю гармонику частоты выхлопов, а в задней полусфере (рис. 5,в) максимум ЭС приходится на 5-ю гармонику частоты выхлопов.

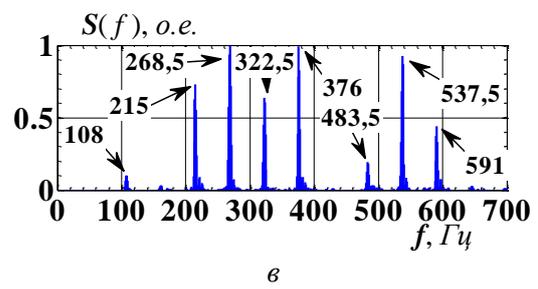
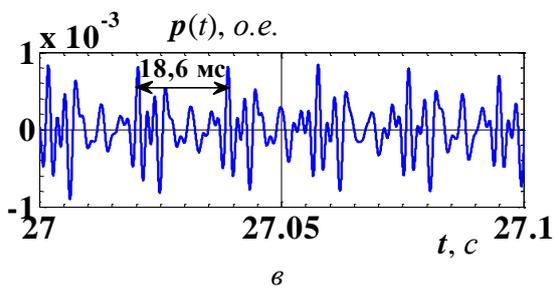
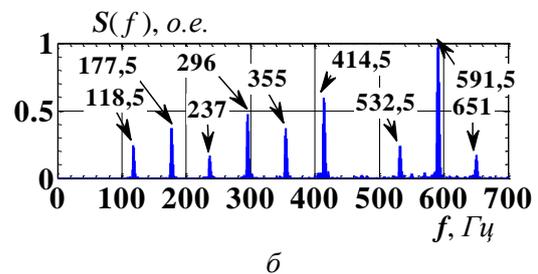
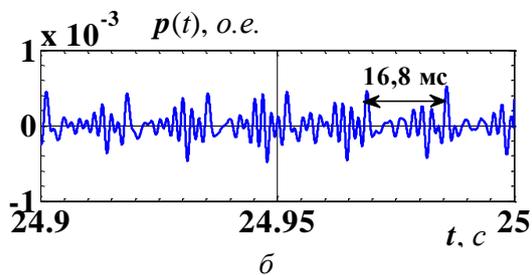
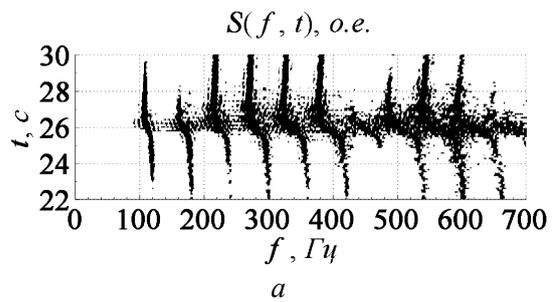
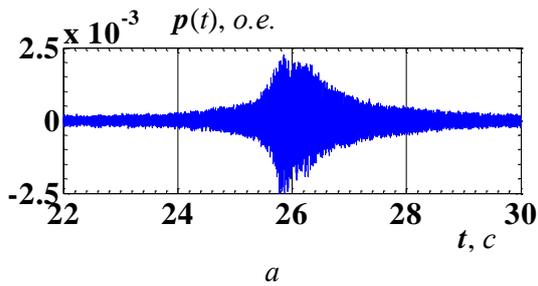


Рис. 4. Временные реализации АС мопеда:  
*a* — общий вид; *б* — при приближении;  
*в* — при удалении

Рис. 5. Спектральные характеристики АС мопеда:  
*a* — спектрограмма; *б* — ЭС при приближении;  
*в* — ЭС при удалении

Период повторения выхлопов при приближении мопеда равен 16,8 мс (рис. 4,б), что соответствует частоте выхлопов на входе акустического приемника  $f_{vh-pr}=59,5$  Гц. Соответственно, вторая гармоника частоты выхлопов равна 119 Гц, что соответствует ЭС рис. 5,б. При удалении мопеда, частота выхлопов на входе акустического приемника равна  $f_{vh-ud}=1/0,0186=53,8$  Гц (рис. 4,в). Ей соответствует вторая гармоника 108 Гц (рис. 5,в).

Результаты вычислений скорости мопеда, выполненные в соответствии с (3), для всех наблюдаемых спектральных компонент приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты вычисления скорости мопеда для всех спектральных компонент

Наименование параметра	Номера гармоник							
	2	4	5	6	7	9	10	11
$f_{vh-pr}$ , Гц	118,5	237	296	355	414,5	532,5	591,5	651
$f_{vh-ud}$ , Гц	108	215	268,5	322,5	376	483,5	537,5	591
$v_a$ , м/с (км/ч)	15,48 (55,7)	16,26 (58,5)	16,27 (58,6)	16,02 (57,7)	16,27 (58,6)	16,11 (58)	15,98 (57,5)	16,14 (58,1)

### Заключение

Во-первых, при приеме акустических сигналов АТрС, движущихся относительно акустического приемника, наблюдается эффект Доплера, который выражается в изменении периода повторения принятых сигналов выхлопов отработавших газов двигателя. Эти изменения напрямую проявляются в изменении частот гармонических составляющих в спектре. Изме-

ние периода (частоты) следования АС определяется скоростью АТрС и зависит от скорости звука. *Во-вторых*, экспериментально установлено отсутствие принципиальных отличий во временных и спектральных структурах АС, создаваемых движущимися АТрС как в передней, так и в задней полусферах. *В-третьих*, экспериментально подтверждена возможность измерения скорости по АС, создаваемому АТрС при его движении. При этом измерение скорости возможно как по основной частоте выхлопов, так и по ее гармоникам. *В-четвертых*, экспериментально установлено, что предложенная в [3] математическая модель АС выхлопов отработавших газов адекватна практике.

## THE RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF DOPPLER EFFECT AT RECEIVE OF A VEHICLE ACOUSTIC SIGNAL

S.R. HEISTER, A.M. GLADYSHEV

### Abstract

For the first time the results of experimental research of Doppler Effect influence on the spectral-time characteristics of acoustic signals of various types of vehicles in motion are considered by testing the following cars: MAZ bus and moped. Principles of measurement of speed of an acoustic signal from vehicles base on the Doppler Effect proven by results of experimental researches of acoustic signals are considered.

### Литература

1. Кремер И.Я., Кремер А.И., Петров В.М. и др. Пространственно-временная обработка сигналов / Под ред. И.Я. Кремера. М., 1984.
2. Луканин В.Н., Гудцов В.Н., Бочаров Н.Ф. Снижение шума автомобиля. М., 1981.
3. Гейстер С.Р., Гладышев А.М. // Докл. БГУИР. 2009. № 3. С. 17–25.
4. Гейстер С.Р., Гладышев А.М., Гейсер А.С., Джеки А.М. // Докл. БГУИР. 2010. № 1. С. 5–11.
5. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Пер. с англ. М., 2007.
6. Никишин В.Н. // Автомобильная промышленность. 2007. № 2. С. 11–14.
7. Атмосфера: Справочник (Справ. данные, модели) / [Подгот. Ю.С. Седунов и др.] Л., 1991.