

УДК 534.832:534.835:004.065.5

## МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗМОЖНЫХ КАНАЛОВ УТЕЧКИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Г.В. ДАВЫДОВ, Д.М. КАВАН

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

*Поступила в редакцию 21 апреля 2011*

Рассмотрен механизм образования каналов утечки речевой информации за счет возбуждения в элементах ограждающих конструкций колебаний и их распространения за пределы контролируемой зоны. Рассмотрены механизмы преобразования видов колебаний при их распространении по ограждающим конструкциям. Исследованы формы колебания ограждающих элементов конструкций, таких как стены (кирпичные, гипсоблочные), оконные стекла, включая и стеклопакеты, а также элементов конструкций коммуникаций (труб отопления и водоснабжения). Определены амплитуды изгибных колебаний, возбуждающих речевым сигналом, для типовых элементов ограждающих конструкций и уровни колебаний от производственных акустических шумов. Разработана модель возможных каналов утечки речевой информации.

*Ключевые слова:* канал утечки речевой информации, колебания ограждающих элементов конструкций, формы колебаний, преобразование видов колебаний, изгибные колебания, акустические производственные шумы, модель каналов утечки речевой информации.

### Введение

Защита речевой информации, циркулирующей в акустическом виде в выделенном помещении, в первую очередь определяется правильным выбором средств защиты и режимами их работы. Как активные, так и пассивные средства защиты речевой информации должны быть так расположены, чтобы исключить возможность распространения акустических колебаний, несущих речевую информацию за пределы контролируемой зоны для заданного соотношения акустический сигнал, несущий речевую информацию – производственные шумы плюс маскирующие сигналы. Вместе с тем, средства контроля защищенности речевой информации и методики его проведения должны обеспечивать с заданной степенью вероятности невозможность съема речевой информации за пределами контролируемой зоны. Решение указанных задач можно обеспечить лишь в полном комплексе проводимых мероприятий с обоснованием физических сопутствующих процессов и моделей, описывающих физические процессы в математическом виде. В литературе по технической защите информации широко освещаются характеристики средств акустической защиты речевой информации, а также инструментальные методы оценки защищенности речевой информации, основанные на определении характеристик остаточной разборчивости речи. Однако из-за отсутствия разработанных моделей акустических каналов утечки речевой информации в литературе обходят вопросы, где и в каких областях (точках) ограждающих элементов конструкций, находящихся за пределами контролируемой зоны, проводить инструментальный контроль защищенности. Технические средства перехвата акустической информации постоянно совершенствуются и их характеристики улучшаются, что заставляет тщательно подходить к обеспечению защиты речевой информации в выделенных помещениях для переговоров.

В этом плане проблема, поднимаемая в данной работе, весьма актуальна. Целью работы были разработка моделей возможных акустических каналов утечки речевой информации и оп-

ределение характеристик отдельных элементов этих моделей, а также методов выявления акустических каналов утечки речевой информации.

### **Модели каналов утечки речевой информации**

Для построения модели акустических каналов утечки речевой информации необходимо рассмотреть механизм образования каналов утечки и сопутствующие физические процессы. Акустические волны, образующиеся в выделенном помещении в результате речевой деятельности, воздействуют на ограждающие элементы конструкций помещений с уровнем звукового давления порядка 70 дБ в частотном диапазоне от 50 Гц до 10 кГц. При этом имеют место как отражение акустических волн от поверхностей ограждающих конструкций, так и деформация элементов конструкций [1]. Воздействие акустических волн на ограждающие элементы конструкций носит характер распределенной динамической нагрузки с разными фазовыми соотношениями. Вместе с тем, происходит суперпозиция как прямых волн от источника, так и отраженных волн внутри помещения. Под воздействием сложных акустических полей в ограждающих элементах конструкций возбуждается ряд собственных форм изгибных колебаний, что приводит к генерации (возбуждению) акустических волн в совмещенном помещении колеблющимися элементами ограждающих конструкций. Так как спектр речевого сигнала занимает как минимум пять октав, а воздействие характеризуется суперпозицией прямых и отраженных акустических волн с разными углами падения и разными фазовыми соотношениями, то в ограждающих элементах конструкций возбуждается большое число собственных форм изгибных колебаний. В результате чего на частотах собственных форм изгибных колебаний элементов ограждающих конструкций механический импеданс оказывается не значительным, и образуются частоты «акустической прозрачности» ограждающих элементов конструкций. Проникновение акустических волн через ограждающие элементы конструкций в соседнее помещение за счет механизма прямого преломления звука весьма незначительно из-за больших различий в волновых сопротивлениях граничащих сред. Для воздушной среды, граничащей со средой материалов ограждающих конструкций, различия в волновых сопротивлениях более чем в 100 раз [1].

Акустическое поле, образовавшееся за ограждающей конструкцией, будет неоднородным из-за суперпозиции волн от различных участков ограждающих конструкций, которые имеют различные амплитуды. При этом механизм формирования акустического поля за ограждающей конструкцией можно рассматривать как поверхность с пульсирующими областями для заданных частот форм собственных колебаний. В отдельных объемах за ограждающей конструкцией на определенных частотах будут наблюдаться максимумы звуковых давлений и одновременно в этих же объемах, но на других частотах, могут наблюдаться минимумы. Поэтому методика контроля защищенности и определение передаточных характеристик возможных акустических каналов утечки речевой информации требуют тщательного методического обоснования и экспериментальной проверки.

На рис. 1 представлена модель каналов утечки речевой информации по акустическому каналу в обобщенном виде. Происходящие при этом процессы образования акустических каналов утечки речевой информации можно описать следующим образом. Акустическое поле, создаваемое человеком в результате речевой деятельности и несущее определенную информацию, распространяется с определенным затуханием до ограждающих элементов конструкций помещения. Воздействие акустического поля на ограждающие элементы конструкций характеризуется распределенной нагрузкой с разными фазовыми соотношениями для различных точек элементов ограждающих конструкций. В результате чего в ограждающих элементах конструкций возникнут сложные волновые процессы различного характера (продольные, поперечные, поверхностные волны), при которых речевая информация переносится за пределы ограждающих конструкций в виде акустических полей. Следует отметить, что в ограждающих элементах конструкций имеют место и волновые процессы, связанные с производственной деятельностью (шумы оборудования, стуки и др.), на которые накладываются волновые процессы, связанные с переносом речевой информации. Поэтому в процессе распространения речевой информации по акустическому каналу амплитуды сигналов, осуществляющих ее перенос, уменьшаются, что на модели (см. рис. 1) отмечено процессами затухания акустических волн и звукопоглощением.

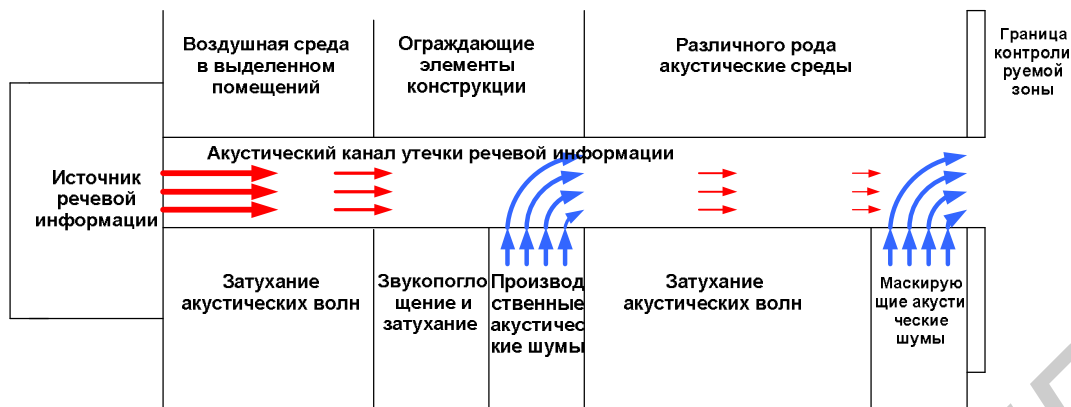


Рис. 1. Модель утечки речевой информации по акустическому каналу в обобщенном виде

На модели также показано, что на участке «ограждающие элементы конструкций» происходит суперпозиция распространяющейся речевой информации с производственными акустическими шумами, что снижает разборчивость речевой информации в возможном канале.

Далее за ограждающими элементами конструкций помещений до границы контролируемой зоны (области, где могут находиться приемники речевой информации) канал утечки речевой информации может выступать как в виде газовой среды, так и в виде твердой среды.

Образовавшееся за ограждающей конструкцией акустическое поле, несущее речевую информацию, будет неоднородным из-за суперпозиции волн от различных участков ограждающих конструкций и будет затухать по мере приближения к границе контролируемой области. От ограждающих конструкций помещений до границы контролируемой зоны могут находиться отдельные участки или непрерывные конструкции из твердой среды или же комбинированных сред. На этом участке канала утечки речевой информации имеет место затухание сигналов, ее переносящих, и дополнительное наложение различного рода шумов.

### Волновые процессы в ограждающих элементах конструкций

Первым барьером на пути утечки речевой информации из защищаемого помещения являются ограждающие конструкции помещения. Для повышения эффективности этого барьера необходимо рассмотреть механизмы и волновые процессы, связанные с передаточными характеристиками ограждающих элементов конструкций. Большинство элементов ограждающих конструкций представляют собой прямоугольные пластинки.

Уравнение поперечных колебаний пластинки с учетом ряда ограничений и допущений в дифференциальной форме имеет вид [2]:

$$D \left( \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) - mhp^2 \omega = 0, \quad (1)$$

где  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}$  – цилиндрическая жесткость пластинки на изгиб;  $E$  – модуль упругости;  $h$  –

толщина пластинки;  $\sigma$  – коэффициент Пуассона;  $\omega$  – прогиб пластинки как функция от  $x$  и  $y$ ;  $x$ ,  $y$  – оси плоскости  $Oxy$ , которая совпадает с нейтральным слоем пластинки;  $m$  – плотность материала пластинки;  $p$  – частота собственной формы колебаний пластинки.

Решение данного уравнения следует искать в виде ряда

$$\omega(x, y) = \sum_{i=1}^{\infty} F_i(y) \sin \frac{i\pi x}{a}, \quad (2)$$

где  $a$  – размер пластинки по оси  $Ox$ ;  $F_i(y)$  – функция, определяемая из уравнения (1) для заданных граничных условий на краях пластинки.

Для случая свободно опертой пластинки по всем краям или шарнирно закрепленной граничные условия запишутся:

$$\text{для } y = 0, \omega(x, 0) = 0, \frac{\partial^2 \omega(x, 0)}{\partial^2 y} = 0,$$

$$\text{для } y = b, \omega(x, b) = 0, \frac{\partial^2 \omega(x, b)}{\partial^2 y} = 0, \text{ где } b \text{ — размер пластинки по оси } Oy;$$

$$\text{для } x = 0, \omega(0, y) = 0, \frac{\partial^2 \omega(0, y)}{\partial^2 x} = 0,$$

$$\text{для } x = a, \omega(a, y) = 0, \frac{\partial^2 \omega(a, y)}{\partial^2 x} = 0.$$

Это означает, что смещения и изгибающие моменты на краях пластинки отсутствуют.

Окончательное выражение для определения частот форм собственных колебаний пластинки для заданных граничных условий имеет вид:

$$p_{ij} = \pi^2 \left( \frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{mh}}, \quad (3)$$

где  $i$  – число форм ( $i-1$  узловых линий) в направлении оси  $Ox$ ;  $j$  – число форм ( $j-1$  узловых линий) в направлении оси  $Oy$ .

Плотности материалов, широко применяемых в качестве ограждающих элементов конструкций, приблизительно равны: для стекла –  $2500 \text{ кг/м}^3$ , для бетона –  $2200 \text{ кг/м}^3$ , для кирпича –  $1800 \text{ кг/м}^3$ .

Модули упругости материалов ограждающих элементов конструкций приблизительно равны: для стекла –  $5,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ , для бетона –  $(1,46 \dots 1,96) \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ , для каменной кладки из кирпича –  $(0,27 \dots 0,30) \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ .

При действии равномерно распределенной нагрузки на пластинку наибольший прогиб будем иметь на первой форме колебаний в центре пластинки [3]

$$\omega_{\max} = \alpha \frac{pa^4}{Eh^3}, \quad (4)$$

где  $p$  – звуковое давление на пластинку;  $a$  – длина меньшей стороны пластинки;  $E$  – модуль упругости;  $h$  – толщина пластинки;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от отношения сторон пластинки  $b/a$ . Значения коэффициента  $\alpha$  приведены в таблице.

Значения коэффициента  $\alpha$

$b/a$	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	3	4	5
$\alpha$	0,0433	0,0616	0,0770	0,0906	0,1017	0,1106	0,1336	0,1400	0,1416

В результате проведенного анализа получены выражения для определения частот собственных колебаний элементов конструкций в виде пластин. Однако определить амплитуды колебаний элементов конструкций на собственных частотах при заданном акустическом воздействии невозможно, т.к. необходимы данные о рассеянии энергии колебаний в заданном материале. Эти данные можно получить экспериментальным путем. Рассеяние энергии колебаний в материалах элементов конструкций зависит в первую очередь от уровня внешнего воздействия, окружающей температуры, состояния поверхности элемента конструкции и характеристик внутреннего трения в исследуемых материалах.

### Методика экспериментальных исследований

Для экспериментальных исследований в качестве образцов были выбраны элементы реальных ограждающих конструкций помещений. Это стены, оконные стекла и стеклопакеты, трубы отопления. Исследования проводились на наружной кирпичной стене здания толщиной

55 см с шириной проема между окнами 180 см, высотой от пола до потолка 320 см и гипсоблочной перегородкой внутри помещения толщиной 9 см, шириной 600 см и высотой от пола до потолка 320 см. Помещение располагалось на четвертом этаже четырехэтажного здания, поэтому продольная нагрузка на наружной стене была не более 4 кг/см<sup>2</sup>. Продольная нагрузка на перегородке отсутствовала. Исследования проводились на внутренней стороне стеклопакета шириной 230 см и высотой 200 см. Измерения проводились в точках со следующими расстояниями от края стеклопакета: 20 см, 30 см, 40 см, 60 см, 80 см. Исследования были проведены также на трубах отопления (диаметр трубы 3/4 дюйма) и на гипсовой блочной стене толщиной 9 см, при этом акселерометры были установлены в противоположных направлениях. Акселерометры были установлены друг напротив друга с различных сторон. Исследования выполнены для помещения типа лаборатория, расположенного в районе города со средней производственной активностью.

Для измерения звуковых давлений акустических волн и вибрации на ограждающих конструкциях помещений были использованы шумомер МАНОМ-4/2 с комплектом микрофонов, акселерометры типа- KD 40, осциллограф типа В-421 и персональная ЭВМ.

Измерение вибраций ограждающих элементов конструкций проводилось в утренние и дневные часы. Число измерений для каждой исследуемой точки не менее 10 в каждой 1/3-октавной полосе частот.

### Результаты экспериментальных исследований и обсуждение

Для построения модели каналов утечки речевой информации проводились экспериментальные исследования производственных акустических шумов, чтобы дополнить численными значениями представленные модели. Исследования проводились для различных элементов ограждающих конструкций. На рис. 2,а приведены усредненные значения ускорений вибраций двухкамерных стеклопакетов в 1/3-октавных полосах частот. Уровни ускорений вибраций выражены в децибелах относительно опорного значения ускорения вибрации равно  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$ . Как видно из представленных зависимостей, уровни вибраций в 1/3-октавных полосах частот с увеличением средних значений полос частот имеют тенденцию к уменьшению. Усредненные значения ускорений вибраций производственных акустических шумов на стеклах двухкамерных стеклопакетов и различных точках кирпичной стены показаны на рис. 2 в 1/3 октавных полосах частот. Как видно из рис. 2,а, уровни ускорений вибраций от производственных шумов на стеклах стеклопакетов значительно выше, чем на кирпичных стенах. При этом с повышением частоты уровни ускорений вибраций на стеклах стеклопакетов имеют тенденцию к уменьшению с 85 дБ на средней частоте 125 Гц 1/3-октавной полосы до 48 дБ на средней частоте 8000 Гц 1/3-октавной полосы. Для кирпичных стен уровни ускорений вибраций, вызванных производственными шумами на средней частоте 125 Гц, составляют около 60 дБ, а на средней частоте 8000 Гц – 48 дБ. Подъем характеристики на средних частотах в 500 Гц, 630 Гц связан с резонансными свойствами конструкции стены в этом диапазоне частот.

На рис. 2,б показаны уровни ускорений вибраций гипсоблочной перегородки толщиной 9 см и размерами 300×600 см в 1/3-октавных полосах частот, вызванных производственными шумами.

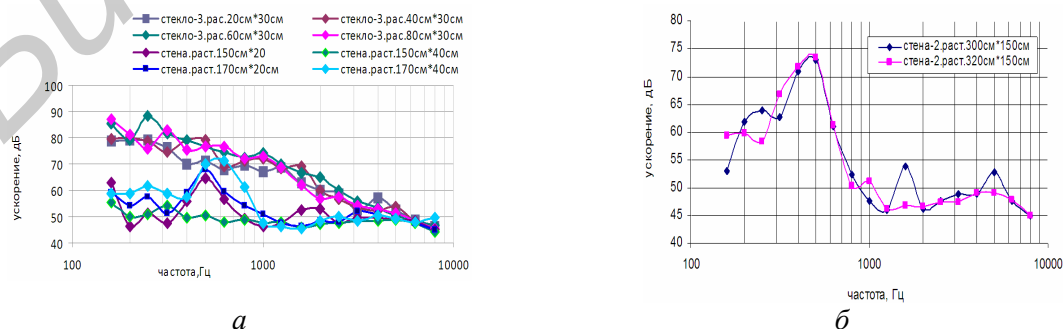


Рис. 2. Ускорения вибраций в 1/3-октавных полосах частот, вызванных производственными шумами:  
 а – на стеклах двухкамерных стеклопакетов и в различных точках кирпичной стены;  
 б – гипсоблочной перегородке толщиной 9 см

Измерения проводились на расстоянии 150 см от пола и соответственно 320 см и 300 см от капитальной стены. Как видно из представленных на рис. 3 зависимостей, уровни ускорений вибраций на средней частоте в 400 Гц, 500 Гц в 1/3-октавных полосах имеют подъем, обусловленный резонансными свойствами перегородки. На этих частотах имеет место резонанс первой формы колебаний конструкции перегородки. На средней частоте 1600 Гц и 5000 Гц отмечены менее ярко выраженные резонансы более высоких форм собственных колебаний.

Весьма важной характеристикой является вид волн, возбуждаемых в элементах конструкций, что было проверено экспериментальным путем на таких элементах конструкций как стены, водопроводные трубы и перегородки.

На рис. 3,а представлены осциллограммы ускорений вибраций, записанных с акселерометров, установленных друг против друга с различных сторон перегородки.

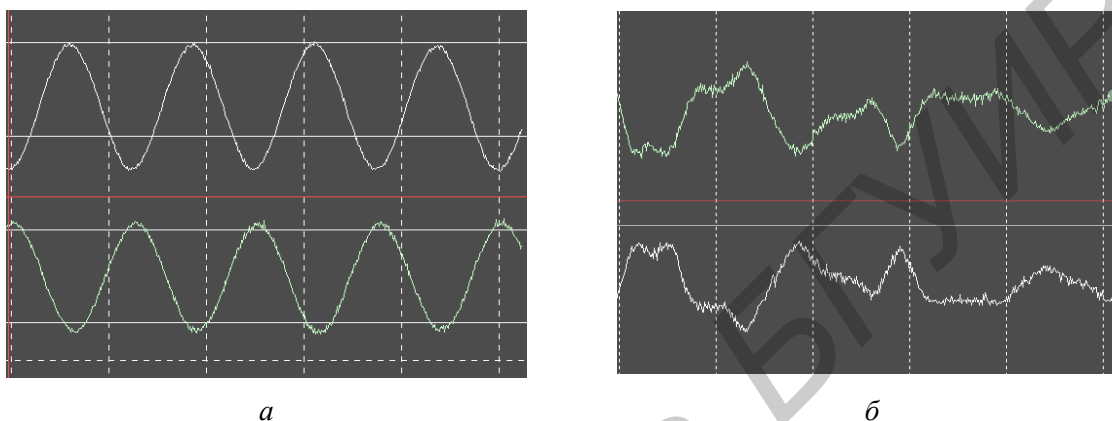


Рис. 3. Осциллограммы ускорений вибраций, записанных с акселерометров, установленных друг против друга с различных сторон исследуемых объектов: а – для перегородки; б – для трубы отопления

Возбуждение колебаний осуществлялось путем ударов по капитальной стене здания на расстоянии 6 м от перегородки. Как показывает анализ представленных осциллограмм, на перегородке имели место изгибные колебания, так как сигналы с акселерометров находятся в противофазе. Проведенный эксперимент показывает, что в ограждающих элементах конструкций имеет место преобразование вида волн (колебаний). Продольные волны в толстых капитальных стенах здания могут трансформироваться в изгибные колебания относительно тонких перегородок. Аналогичные результаты были получены и при акустическом воздействии на перегородки, т.е. имели место изгибные колебания перегородки.

Как показал анализ полученных осциллограмм, на водопроводных трубах отопления имели место изгибные колебания, так как сигналы с акселерометров находятся в противофазе. Это указывает на то, что при речевой деятельности в выделенном помещении с системой водяного отопления, возбуждаются изгибные колебания водопроводных труб на частотах, соответствующих речевому акустическому сигналу. Эти изгибные колебания, распространяясь по водопроводным трубам за пределы помещения, переносят речевую информацию за пределы охранной зоны, образуя канал утечки речевой информации. На рис. 3,б показаны осциллограммы ускорений вибраций водопроводных труб отопления для соседнего помещения при акустической речевой деятельности в другом помещении.

Представленные на рис.3,б осциллограммы подтверждают факт того, что речевая информация может передаваться из выделенного помещения за его пределы по водопроводным трубам отопления в виде изгибных колебаний труб.

### Заключение

Одним из этапов защиты речевой информации в выделенном помещении является этап обнаружения возможных акустических каналов утечки речевой информации. Основными каналами являются: системы водопроводной и отопительной коммуникаций, системы вентиляции, отверстия возле электропроводки, щели и трещины в ограждающих элементах конструкций, неплотности дверных и оконных проемов, стены, окна, пол и потолок. Предложенная в работе модель канала утечки информации является обобщенной. Для данной модели исследованы

уровни производственных акустических шумов. В результате экспериментальных исследований установлено, что речевая информация передается за пределы выделенного помещения путем возбуждения изгибных колебаний ограждающих элементов конструкций и формированием акустических полей в воздушной среде за ограждающими конструкциями. Акустические поля за ограждающими конструкциями формируются из распределенных по конструкциям максимумов и минимумов прогибов.

## METHODS OF DETECTION AND DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF LEAK CHANNELS OF SPEECH INFORMATION

H.V. DAVYDAU, D.M. KAVAN

### Abstract

The formation mechanism of leakage channels of speech information due to the excitation vibrations in the frame structures elements and their distribution outside the controlled area is reviewed. The transformation mechanisms of the oscillations during their propagation in building envelopes are reviewed. The oscillations forms of structural elements such as walls (brick, gypsum blocks), including window glass and windows, as well as structural elements of communication (heating pipes and water supply) are investigated. The amplitude of bending vibrations that excite the speech signal for the elements of frame structures and levels of vibrations from the production of acoustic noise are determined. The model of leakage channels of speech information is developed.

### Литература

1. Давыдов Г.В., Каван Д.М., Попов В.А., Потапович А.В. // Докл. БГУИР. 2009. № 4. С. 49–54.
2. Бабаков И.М. Теория колебаний. М., 1968.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М., 1972.