

ВЛИЯНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ

THE EFFECT OF SOUND INSULATION OF ENCLOSING STRUCTURES ON SPEECH INTELLIGIBILITY

A. Bushmanov
A. Lozhkova

Summary. This article presents the results of a study examining the effect of sound insulation properties of enclosing structures on speech intelligibility. During the experiments, speech elements were reproduced in an acoustically muffled chamber, pretreated with filters that simulate the sound insulation of various fences when exposed to background noise of different origins. The results of the articulation tests were compared with the data obtained using modeling performed using formant and formant-modulation methods. This study allows us to quantify how sound insulation affects speech intelligibility.

Keywords: sound insulation, speech intelligibility, articulation tests, formants, noise.

Бушманов Александр Вениаминович

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»
bush29@mail.ru

Ложкова Анна Александровна

аспирант,
ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»
zabolashka@bk.ru

Аннотация. В данной статье представлены результаты исследования, изучающего влияние звукоизоляционных свойств ограждающих конструкций на разборчивость речи. В ходе экспериментов в акустически заглушенной камере были воспроизведены речевые элементы, предварительно обработанные фильтрами, имитирующими звукоизоляцию различных ограждений при воздействии фонового шума разного происхождения. Результаты проведённых артикуляционных испытаний сопоставлены с данными, полученными с помощью моделирования, выполненного с использованием формантного и формантно-модуляционного методов. Это исследование позволяет количественно оценить, насколько звукоизоляция влияет на разборчивость речи.

Ключевые слова: звукоизоляция, разборчивость речи, артикуляционные испытания, форманты, шум.

Введение

В настоящее время, в связи с возросшим интересом общества и государства к вопросам информационной безопасности, возникает необходимость в правильной оценке защищенности информации. Согласно Указу Президента Российской Федерации от 01.05.2022 N 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации», приоритетным направлением деятельности на ближайшее время является повышение устойчивости и безопасности функционирования информационных ресурсов и информационной безопасности в целом.

Цель данной статьи заключается в анализе влияния звукоизоляции ограждающих конструкций на разборчивость речи, что является небольшим вкладом в развитие области противодействия техническим средствам разведки. Одной из основных угроз безопасности информации ограниченного доступа является утечка информации через технические каналы. Под утечкой информации понимается неконтролируемое распространение информативного сигнала от его источника через физическую среду до технического устройства, принимающего информацию.

Перехват информации представляет собой неправомерное получение данных с использованием техниче-

ских средств, способствующих обнаружению, приему и обработке информативных сигналов. В настоящее время существует множество технических каналов утечки информации, среди которых выделяются каналы утечки речевой информации, подразделяющиеся на воздушные, параметрические, вибрационные, электроакустические и другие.

Эффективность звукоизоляции воздушного шума ограждающих конструкций измеряется в децибелах, как логарифмическое отношение интенсивности падающего звука ($I_{пад}$) к интенсивности звука, прошедшего через ограждение ($I_{пр}$):

$$R = 10 \lg \frac{I_{пад}}{I_{пр}}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где $I_{пад}$ — интенсивность звука падающей на ограждение волны, $I_{пр}$ — интенсивность звука, прошедшего через ограждение.

Для оценки звукоизоляции в практических целях используется индекс изоляции воздушного шума (R_w), который рассчитывается на основе известных (рассчитанных или измеренных) частотных характеристик звукоизоляции ограждающих конструкций, выраженных в децибелах. Этот индекс определяется путем сопоставления данных характеристик с эталонной частотной ха-

рактической звукоизоляции, согласно стандарту ISO 717-1 [1, с. 2].

Разборчивость речи — это показатель, описывающий способность человека воспринимать и понимать речевой сигнал. Этот параметр включает в себя такие аспекты, как слуховое восприятие, частотное распределение сигнала и способность человека догадываться о словах исходя из контекста. В отличие от звукоизоляции, которая оценивает физические параметры конструкции, разборчивость речи принимает во внимание и субъективные факторы восприятия, связанные с человеком, для которого осуществляется передача сигнала. Понимание взаимосвязи между разборчивостью речи и звукоизоляционными характеристиками ограждающих конструкций позволяет упростить процесс оценки защиты помещений от прослушивания и оптимизировать звукоизоляционные свойства перегородок с учетом особенностей восприятия [2, с. 13].

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования, направленных на изучение влияния звукоизоляции различных ограждающих конструкций на разборчивость речи.

В процессе исследования были учтены следующие ключевые аспекты:

1. **Артикуляционные измерения** проводились в лаборатории при ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», что позволило получить более точные результаты.

2. **Диапазон частотной характеристики изоляции воздушного шума (R, дБ)** был расширен до 31,5–10 000 Гц. Показатели звукоизоляции за пределами стандартного диапазона частот были получены в соответствии с исследованиями, направленными на изучение звукоизоляции в расширенном частотном диапазоне [3, с. 21].
3. В эксперименте также были учтены различные виды шумов с разными спектральными характеристиками:
 - искусственно сгенерированный **белый шум**, **розовый шум**, естественный шум **транспортного потока**.

Эти аспекты позволили детально изучить влияние звукоизоляции на разборчивость речи в различных акустических условиях.

Артикуляционные испытания

Для оценки влияния звукоизоляции на разборчивость речи были проведены артикуляционные испытания, в которых принимали участие дикторы и слушатели. Эксперимент включал следующие ключевые этапы:

1. Диктор в лаборатории прочитал 20 артикуляционных таблиц.
2. Звуковые файлы были обработаны с помощью набора октавных фильтров, которые имитировали звукоизоляционные свойства ограждающих конструкций.
3. Респонденты прослушивали отфильтрованные сигналы на фоне устойчивого шума с уровнем

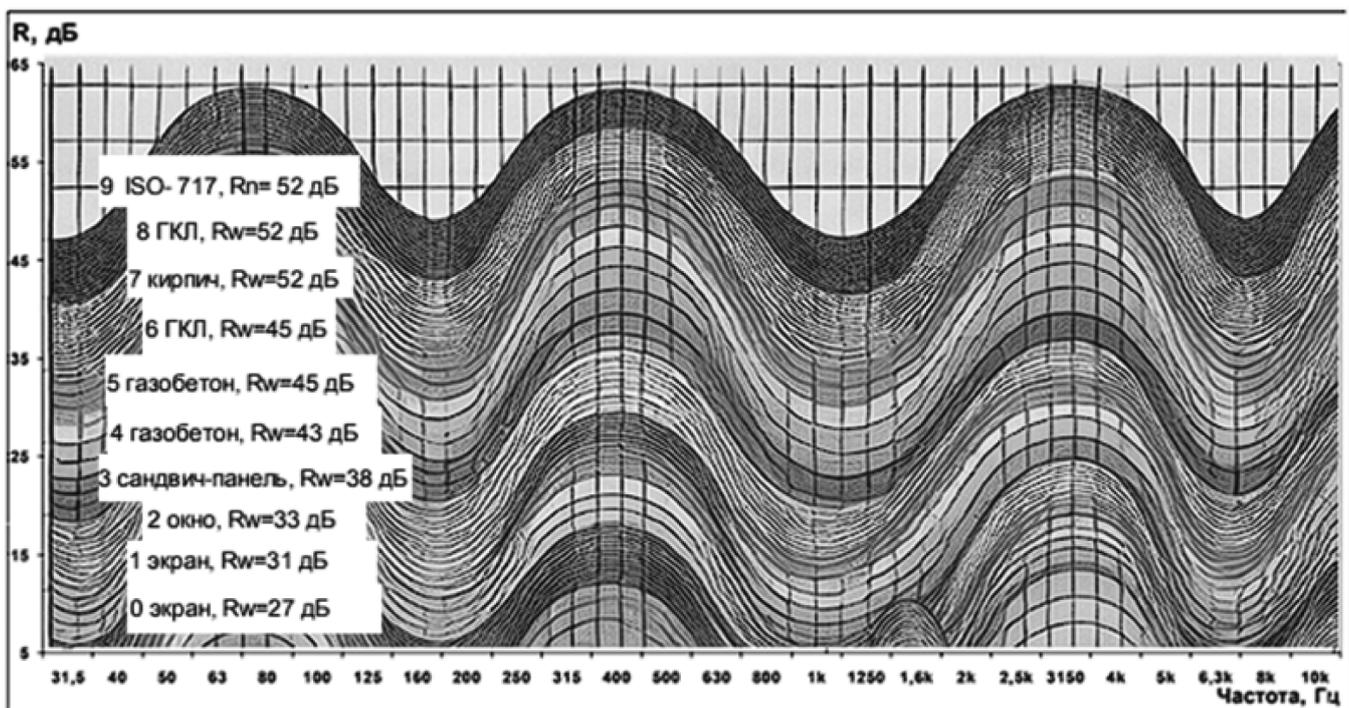


Рис. 1. Частотные характеристики звукоизоляции

30 дБА. Разборчивость речи оценивалась в соответствии с установленной процедурой, и включала воздействие различных типов шума: белого, розового и транспортного.

Для эксперимента были отобраны ограждающие конструкции с частотными характеристиками изоляции воздушного шума, индекс которых варьировался в диапазоне от 25 до 55 дБ. Частотные характеристики звукоизоляции этих конструкций представлены на рисунке 1.

Этот этап позволил проанализировать, как различные уровни звукоизоляции и виды фонового шума влияют на разборчивость речи.

Свойства ограждающих конструкций представлены в таблице 1. Звукоизоляционные характеристики ограждающих конструкций зависят от спектра шума, который воздействует на ограждение. Для учёта этого фактора вводятся специальные параметры «спектральной адаптации», которые дополняют значения индексов звукоизоляции. Шум с частотным спектром, схожим с «розовым» шумом, описывается показателем C , а шум, характерный для транспортных средств, характеризуется показателем Str [1]. Для моделирования были выбраны конструкции с одинаковым индексом изоляции воздушного шума, но различающимися по показателям спектральной адаптации [4, с. 87].

Таблица 1.

Свойства ограждающих конструкций, задействованных в испытаниях

№	Описание	Толщина, мм	Индекс изоляции воздушного шума, R_v , (C , Str), дБ
0	Панель шумопоглощающего экрана	130	27 (-1, -3)
1	Панель шумоизоляционного экрана	130	31 (-2, -5)
2	Двухкамерное стекло	70	33 (-1, -3)
3	Сэндвич-панель с облицовкой OSB	225	38 (-2, -5)
4	Монолитная газобетонная перегородка	120	43 (-1, -3)
5	Монолитная газобетонная перегородка	300	45 (-1, -3)
6	Каркасная гипсокартонная перегородка	100	38 (-3, -8)
7	Монолитная кирпичная перегородка (двухслойная)	255	52 (-2, -5)
8	Каркасная гипсокартонная перегородка	125	40 (-2, -7)
9	Оценочная характеристика в соответствии с ISO-717		52 (0, -4)

Все конструкции обладают различными индексами звукоизоляции в зависимости от их толщины и материала, что демонстрирует их способность к изоляции воздушного шума.

Компьютерное моделирование

Для оценки влияния звукоизоляции на разборчивость речи с использованием инструментальных методов и возможностей персонального компьютера был смоделирован процесс распространения звука через ограждающую конструкцию. В ходе моделирования произведён расчёт разборчивости переданного сигнала с применением формантного и формантно-модуляционного методов [5, с. 8]. Этапы моделирования представлены ниже.

1. Были загружены файлы с речевыми фрагментами, записанными в заглушённой камере в ходе проведения артикуляционных испытаний.
2. Сгенерирован модулированный сигнал, имитирующий речь, с частотным спектром, соответствующим долговременному спектру речи.
3. Загруженные и сгенерированные сигналы прошли через набор октавных фильтров, коэффициенты ослабления которых были эквивалентны показателям звукоизоляции ограждающих конструкций.
4. Оценка разборчивости речи проводилась при воздействии различных типов шума: белого шума, розового шума и шума транспортного потока. При этом шум транспортного потока моделировался с помощью коричневого шума, основываясь на данных натуральных измерений транспортных шумов.
5. Разборчивость речи была рассчитана с использованием формантного метода и формантно-модуляционного метода [6, с. 134].

Процесс оценки разборчивости речи на основе известных значений звукоизоляции представлен поэтапно:

1. **Запись речевого сигнала** — исходный речевой сигнал фиксируется.
2. **Звукоизоляция** — применяется звукоизоляция ограждающей конструкции, что влияет на прохождение звука.
3. **Генерирование шума** — создается шум (белый, розовый или транспортный), который воздействует на сигнал.
4. **Оценка парциальных отношений сигнал/шум** — оценивается соотношение уровня полезного сигнала к шуму;
5. **Оценка разборчивости речи** — производится итоговая оценка разборчивости речи в условиях звукоизоляции и шумового воздействия.

Для проведения моделирования были отобраны те же ограждающие конструкции, что использовались в артикуляционных испытаниях.

Результаты артикуляционных тестов, касающиеся разборчивости речи в зависимости от уровня звукоизоляции, представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Значение разборчивости слов, полученные путем артикуляционных испытаний

Номер ограждающей конструкции	Разборчивость слов, при действии шума транспорта	Разборчивость слов, при действии розового шума	Разборчивость слов, при действии белого шума	Индекс изоляции воздушного шума, Rw, дБ
0	0,83	0,70	0,82	26
1	0,76	0,61	0,55	30
2	0,81	0,67	0,40	32
3	0,19	0,17	0,22	37
4	0,16	0,11	0,15	42
5	0,04	0,03	0,15	44
6	0,05	0,05	0,06	44
7	0	0	0,02	51
8	0,03	0,03	0,03	51
9	0,02	0,01	0	51

Результаты математического моделирования разборчивости слов в зависимости от индекса изоляции воздушного шума и метода расчета отображены на рисунках 2–4. На графиках используются следующие обозначения:

Formant-modulated — разборчивость слов, вычисленная с помощью формантно-модуляционного метода;

Формантная разборчивость в каждой полосе:

$$A = \sum_{k=1}^N p_k \times P(E'_k), \tag{2}$$

где p_k — вероятность пребывания формант в k -том частотном диапазоне, $P(E'_k)$ — коэффициент восприятия, которая учитывает потери разборчивости из-за наличия мешающих факторов, E'_k — эффективный уровень ощущения формант [7, с. 19].

Эффективный уровень ощущения формант:

$$E_k = \overline{SNR_k}, \tag{3}$$

где SNR_k — эффективное отношение сигнал-шум.

Эффективное отношение сигнал-шум:

$$\overline{SNR_k} = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} SNR_{k,i}, \tag{4}$$

$$SNR_{k,i} = 10 \lg \frac{m_k(F_i)}{1 - m_k(F_i)}, \tag{5}$$

где $m_k(F_i)$ — коэффициент модуляции.

Коэффициент модуляции:

$$\tilde{m}_k(F_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_i T}{13.8}\right)^2}} \frac{1}{1 + 10^{-0,1((S-R)/N)}}, \tag{6}$$

где T — взаимное время реверберации двух помещений, $(S - R) / N$ — отношение сигнал-шум, с учетом звукоизоляции в дБ.

Чтобы упростить формулу (6), зависимость от частоты была опущена [9, с. 24].

Format-modulated modeling — разборчивость слов, рассчитанная с использованием формантно-модуляционного метода;

Formant modeling — разборчивость слов, определенная на основе формантного моделирования;

Articulated — разборчивость слов, полученная в ходе артикуляционных испытаний (таблица 2).

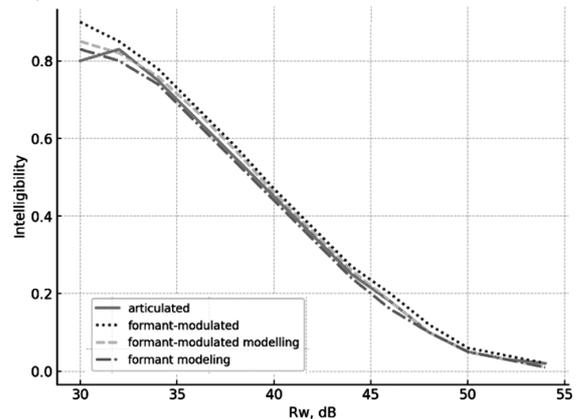


Рис. 2. Разборчивость слов в зависимости от звукоизоляции при воздействии шума транспорта

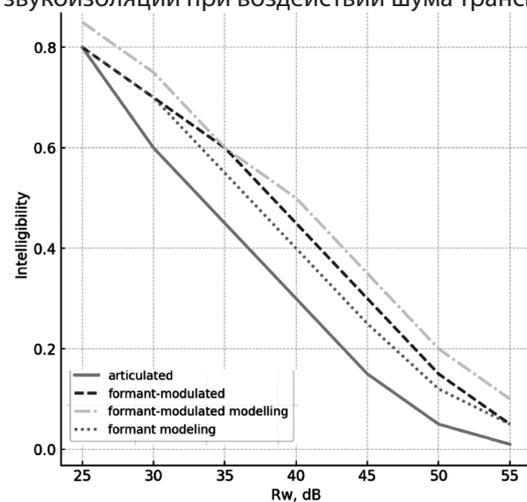


Рис. 3. Разборчивость слов в зависимости от звукоизоляции при воздействии белого шума

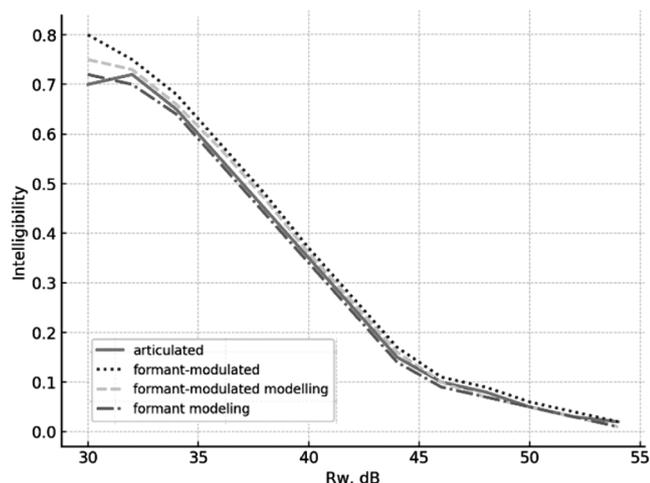


Рис. 4. Разборчивость слов в зависимости от звукоизоляции при воздействии розового шума

Как видно из графиков на рисунках 2–4, при воздействии белого шума зависимость разборчивости речи от звукоизоляции имеет наиболее линейный характер. Расчет разборчивости слов при белом шуме также демонстрирует наибольшую погрешность для значений индекса звукоизоляции от 32 до 40 дБ, в то время как для звукоизоляции от 45 дБ наблюдается наименьшая погрешность [10, с. 41]. При воздействии розового шума и шума транспортного потока результаты оценки разборчивости речи для низких значений звукоизоляции

оказались завышенными, что следует учитывать при применении указанных методов [8, с. 15].

Характер зависимости разборчивости речи, полученной в ходе артикуляционных испытаний, совпадает с характером разборчивости, определенной с использованием методов моделирования.

Заключение

- приведены расчеты разборчивости речи в зависимости от звукоизоляционных свойств ограждающих конструкций с использованием различных методов. Подчеркнуто, что наибольшее соответствие экспериментальным данным демонстрирует методика, основанная на расчете коэффициента модуляции;
- обнаружено, что при воздействии шума транспортного потока наблюдается наиболее нелинейная зависимость разборчивости речи от звукоизоляции;
- характер зависимости разборчивости речи от звукоизоляции совпадает как для результатов, полученных методом артикуляционных испытаний, так и для результатов, полученных с помощью моделирования. Для оценки разборчивости речи в зависимости от звукоизоляции рекомендуется использовать представленные выше методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. ISO 717-1:1996 Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation, Switzerland, 1996.
2. Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи. — М.: Связьиздат, 1962. 392 с.
3. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. Перевод с немецкого под редакцией Б.Г. Белкина. — М., «Связь», 1971. 255 с.
4. Park H.K., Bradley J.S. and Gover B.N. Evaluation of Airborne Sound Insulation in Terms of Speech Intelligibility // IRC Research Report, IRC RR-228, 2007.
5. ГОСТ 25902–83. «Зрительные залы. Методы определения разборчивости речи».
6. Трушин В.А. Экспериментальная оценка разборчивости речи в задачах защиты информации на основе модифицированных артикуляционных испытаний / В.А. Трушин, И.Л. Рева, А.В. Иванов // Актуальные проблемы электронного приборостроения: матер. X Междунар. конф. — Новосибирск, 2010. — Т. 3. — С. 133–135.
7. МИ 2083–90. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. — М.: Издательство стандартов, 1991. — 17 с.
8. ГОСТ Р 50840–95 Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. — М.: Госстандарт России, 1995. — 230 с.
9. Рева И.Л. Организация эксперимента по оценке разборчивости речи со связными текстами. [Текст] / И.Л. Рева // Сборник научных трудов НГТУ №4(62) 2010.
10. Железняк В.К., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации // Специальная техника. — 2000. — № 4. — С. 39–45.