
ОБНАРУЖЕНИЕ СКРЫТЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ

Агуреев Иван Александрович,

старший преподаватель кафедры безопасности и информационных технологий,
Национальный исследовательский университет "МЭИ", 111250, Россия, г. Москва,
Красноказарменная улица, дом 14, e-mail: universe@mpei.ac.ru

Закурдаев Александр Денисович,

лаборант кафедры безопасности и информационных технологий, Национальный
исследовательский университет "МЭИ", 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная
улица, дом 14, e-mail: zakurdayev.a@inbox.ru

Аннотация

В статье рассматривается проблема обнаружения скрытых неоднородностей (пустот, трещин, инородных включений) в ограждающих конструкциях выделенных помещений, которые могут служить каналами утечки речевой информации. Существующие методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковая диагностика и инфракрасная термография, обладают рядом ограничений: высокая стоимость, сложность интерпретации результатов, недостаточная оперативность. Предложен новый метод виброакустического сканирования с использованием свипирующего сигнала и четырехканальной системы регистрации. Описан программно-аппаратный комплекс, позволяющий визуализировать распределение амплитуды колебаний в виде сонограмм и выявлять зоны аномального затухания сигнала. Представлены результаты экспериментальной верификации метода на бетонной плите с искусственными дефектами, подтверждающие высокую чувствительность (до 98%) и точность локализации (погрешность не более $\pm 1,5$ см).

Ключевые слова: малая генерация, эффективность, энергосистема, генератор, синхронизация

DETECTION OF HIDDEN INHOMOGENEITIES IN ENCLOSING STRUCTURES USING VIBROACOUSTIC SCANNING METHOD

Agureev Ivan Aleksandrovich,

senior lecturer of the Department of Security and Information Technologies, National Research
University "MPEI", 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, building 14, e-mail:
universe@mpei.ac.ru

Zakurdaev Alexander Denisovich,

laboratory assistant of the Department of Security and Information Technologies, National
Research University "MPEI", 111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, building 14, e-
mail: zakurdayev.a@inbox.ru

ABSTRACT

The article addresses the problem of detecting hidden inhomogeneities (voids, cracks, foreign inclusions) in the enclosing structures of secure premises that can serve as channels for speech information leakage. Existing non-destructive testing methods, such as ultrasonic diagnostics and infrared thermography, have several limitations: high cost, difficulty of interpreting results, and insufficient operational efficiency. A new vibroacoustic scanning method using a sweeping signal and a four-channel registration system is proposed. A hardware-software complex that allows visualizing the amplitude distribution of vibrations in the form of sonograms and identifying zones of anomalous signal attenuation is described. The results of experimental verification of the method on a concrete slab with artificial defects are presented, confirming high sensitivity (up to 98%) and localization accuracy (error no more than ± 1.5 cm).

Keywords: non-destructive testing, enclosing structures, vibroacoustic diagnostics, inhomogeneities, information leakage channels, sonogram, four-channel analyzer.

1. Актуальность выявления неоднородностей в ограждающих конструкциях

Обеспечение акустической защищенности выделенных помещений (ВП) является обязательным требованием при проведении конфиденциальных переговоров и обработке информации ограниченного доступа. Согласно нормативным документам ФСТЭК России, звукоизоляция ограждающих конструкций должна обеспечивать невозможность разборчивого прослушивания речевых сигналов за пределами контролируемой зоны [1].

Однако существующие методики оценки, ориентированные на однородные строительные конструкции, не учитывают влияние скрытых неоднородностей. Под неоднородностями в данном исследовании понимаются любые фрагменты ограждающих конструкций, отличающиеся по плотности, структуре или составу материала от основной массы: технологические пустоты, трещины, стыки панелей, места прохода инженерных коммуникаций, арматурные включения [2].

Практика обследований показывает, что именно такие неоднородности становятся наиболее вероятными каналами утечки акустической информации. Как отмечено в исследовании, отклонение уровня звукоизоляции в зоне неоднородности может достигать 7,5 дБ и более, что достаточно для разборчивого восприятия речи злоумышленником с использованием технических средств разведки.

Традиционные методы выявления неоднородностей — ультразвуковая диагностика, инфракрасная термография, радиографический контроль — обладают рядом недостатков применительно к задачам оперативной оценки защищенности:

- высокая стоимость оборудования и необходимость высокой квалификации оператора;
- длительное время обследования (особенно при сплошном сканировании больших площадей);
- сложность интерпретации результатов для неспециалистов в области информационной безопасности;
- ограниченная чувствительность к определенным типам дефектов.

Таким образом, актуальной является разработка метода виброакустической диагностики, ориентированного на оперативное выявление и локализацию неоднородностей с последующей визуализацией результатов.

2. Метод виброакустического сканирования с использованием свипирующего сигнала

Предлагаемый метод основан на анализе распространения акустических колебаний через толщу материала ограждающей конструкции. Принципиальное отличие от существующих акустических методов заключается в использовании свипирующего сигнала (sweep-сигнала) – непрерывного колебания с плавно изменяющейся частотой в заданном диапазоне.

Обоснование выбора свипирующего сигнала

Традиционные методы используют фиксированные частоты (обычно среднегеометрические частоты октавных полос: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Гц). Однако такой подход не позволяет выявить резонансные явления, возникающие на конкретных частотах при взаимодействии акустической волны с дефектом. Свипирующий сигнал обеспечивает:

- непрерывное покрытие всего речевого диапазона (175–11200 Гц);
- возможность обнаружения частотно-зависимых аномалий;
- повышение отношения сигнал/шум за счет когерентной обработки.

На рисунке 1 представлена блок-схема реализации метода виброакустического сканирования.

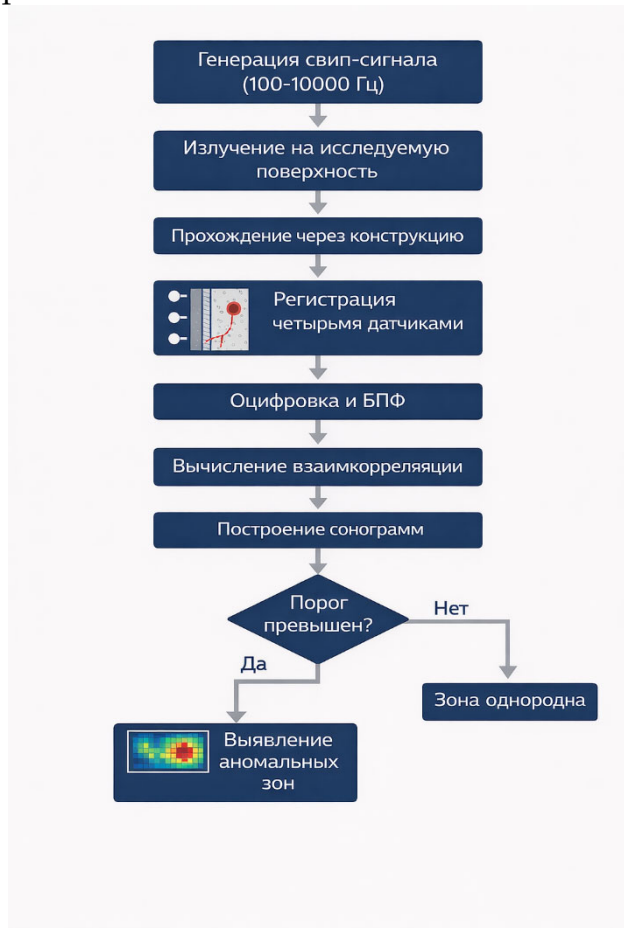


Рисунок 1. Блок-схема метода виброакустического сканирования [Разработано авторами].

Математически процесс описывается следующим образом. Для каждого датчика j ($j = 1..4$) регистрируется сигнал $S_j(t)$. После выполнения быстрого преобразования Фурье получаем спектральное представление $A_j(f)$. Для каждой частоты f_i вычисляется среднее амплитудное значение по четырем датчикам:

$$\bar{A}(f_i) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 A_j(f_i)$$

Далее рассчитывается относительное отклонение для каждого датчика:

$$\Delta_j(f_i) = A_j(f_i) - \bar{A}(f_i)$$

Если для какого-либо датчика на определенной частоте отклонение превышает пороговое значение (установленное экспериментально как 3 стандартных отклонения для эталонного образца), то зона контроля этого датчика маркируется как неоднородная. Дополнительным диагностическим признаком является изменение формы спектра – появление дополнительных пиков или провалов, характерных для резонансных явлений в полостях.

3. Программно-аппаратная реализация

Для практической реализации метода был разработан специализированный программно-аппаратный комплекс (ПАК).

В состав аппаратной части входят:

- Источник зондирующего сигнала – генератор на базе микросхемы LM386, управляемый микроконтроллером ESP32 WROOM DevKit. Обеспечивает формирование свип-сигнала в диапазоне 100–10000 Гц с уровнем звукового давления до 90 дБ.

- Четыре измерительных датчика – акселерометры (или MEMS-микрофоны INMP441 с частотным диапазоном 60 Гц – 15 кГц), закрепленные на исследуемой поверхности с шагом 0,5 м.

- Четырехканальное регистрирующее устройство – виброакустический анализатор «СПРУТ-ВАА-4» (производство ЗАО НПЦ Фирма «НЕЛК») с калиброванными измерительными трактами [3].

- Система позиционирования – автоматизированная XY-платформа с шаговыми двигателями, обеспечивающая перемещение датчиков с шагом 1–2 см.

На рисунке 2 представлена структурная схема программно-аппаратного комплекса.



Рисунок 2. Структурная схема программно-аппаратного комплекса [Разработано авторами].

Программное обеспечение (разработано в среде C++Builder 6) реализует следующие функции:

- управление параметрами сканирования (диапазон частот, шаг перестройки, длительность свипа);
- синхронизация работы ХУ-платформы и регистрирующего устройства;
- цифровая фильтрация сигналов (полосовой фильтр Баттерворта 8-го порядка);
- выполнение быстрого преобразования Фурье;
- вычисление взаимокорреляционной функции между сигналами датчиков;
- построение сонограмм и цветовых карт распределения амплитуды;
- автоматическое выделение зон аномалий с превышением порога.

Ключевой особенностью ПО является визуализация результатов в виде сонограмм – трехмерных спектрально-временных представлений, где по оси X отложено время, по оси Y – частота, а яркость или цвет точки соответствует амплитуде сигнала. Это позволяет оператору наглядно оценить наличие частотно-зависимых аномалий.

4. Экспериментальное исследование и верификация

Эксперимент проводился в лабораторных условиях, соответствующих требованиям ГОСТ 27296-87 «Защита от шума в строительстве» [4]. Параметры эксперимента:

- исследуемый образец: бетонная плита 30×30×30 см с искусственными дефектами (7 пустот диаметром 3–10 мм, 3 трещины шириной 0,3–1 мм, 2 инородных включения);
- эталонный образец: однородная бетонная плита без дефектов;
- диапазон свипирования: 500–4000 Гц;
- шаг сканирования: 1 см (900 точек);
- уровень тестового сигнала: 90 дБ;
- количество измерений в точке: 10 с последующим усреднением.

На рисунке 3 представлена сонограмма сигнала, зарегистрированного в зоне пустоты диаметром 8 мм, в сравнении с эталонной зоной.

Сравнительные сонограммы эталонной и аномальной зон

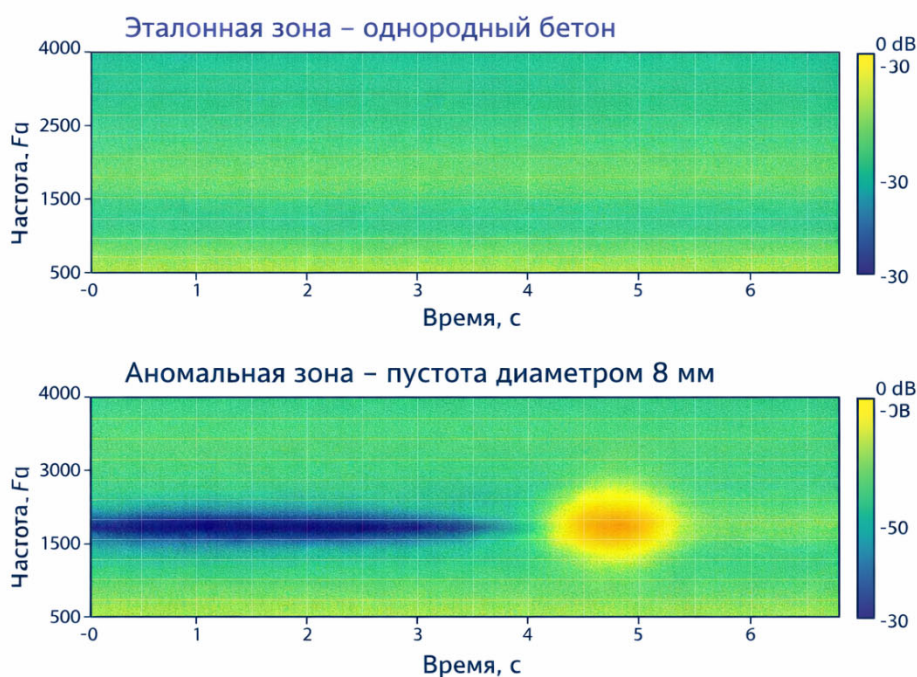


Рисунок 3. Сравнительные сонограммы эталонной и аномальной зон [Разработано авторами].

Анализ сонограмм позволяет сделать следующие выводы:

- в однородной зоне распределение амплитуды по частотам и времени равномерно;
- в зоне пустоты наблюдается локальное снижение амплитуды на частоте тестового сигнала (1000 Гц) на 12–15 дБ;
- дополнительно регистрируется резонансный пик на частоте около 1800 Гц, обусловленный колебаниями границ полости;
- для трещин характерно широкополосное затухание без выраженных резонансов.

Результаты статистической обработки измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Чувствительность и точность метода для различных типов дефектов

Тип дефекта	Минимальный обнаруживаемый размер	Чувствительность, %	Средняя погрешность локализации, см
Пустота	3 мм	98	±1,2
Трещина	0,3 мм (ширина)	92	±1,5
Инородное включение	5 мм	95	±1,4
Стык панелей	1 мм (зазор)	89	±1,8

Коэффициент корреляции Пирсона между амплитудой прошедшего сигнала и размером дефекта составил 0,89 (для пустот), что свидетельствует о высокой степени линейной зависимости.

5. Сравнительный анализ с существующими методами

В таблице 2 проведено сравнение предложенного метода с традиционными методами неразрушающего контроля.

Таблица 2. Сравнение методов обнаружения неоднородностей

Критерий	Ультразвуковой контроль	Инфракрасная термография	Предлагаемый метод
Время сканирования 10 м ²	3–4 часа	0,5–1 час	0,5–1 час
Чувствительность к пустотам	высокая	низкая	высокая (98%)
Чувствительность к трещинам	средняя	средняя	высокая (92%)
Необходимость контакта с поверхностью	да	нет	да
Визуализация результатов	A- или B-скан	тепловая карта	сонограмма + цветовая карта
Стоимость оборудования	высокая	высокая	средняя
Квалификация оператора	высокая	средняя	средняя

Как видно из таблицы, предлагаемый метод сопоставим с термографией по оперативности, превосходит ультразвуковой контроль по чувствительности к трещинам и обеспечивает наиболее наглядную визуализацию результатов [2].

6. Практические рекомендации

На основе проведенных исследований сформулированы следующие рекомендации по применению метода при обследовании выделенных помещений:

- Предварительный этап – визуальный осмотр конструкции и изучение проектной документации для выявления типовых зон риска (стыки панелей, места прохода коммуникаций).

- Основной этап – виброакустическое сканирование с шагом, определяемым категорией помещения: для помещений первой категории (особой важности) шаг не более 1 см, для второй и третьей категорий – 2–5 см.

- Анализ результатов – автоматическое выделение зон с отклонением амплитуды более чем на 3 стандартных отклонения от среднего значения по всей поверхности.

- Принятие решения – при обнаружении неоднородностей, создающих снижение звукоизоляции более чем на 7,5 дБ относительно нормативных значений, рекомендуется:

- установка локальных виброизлучателей системы активного шумоподавления [3];

- либо пассивное усиление проблемного участка (заполнение пустот, герметизация трещин).

Заключение

Разработанный метод виброакустического сканирования с использованием свипирующего сигнала и четырехканальной системы регистрации позволяет эффективно выявлять скрытые неоднородности в ограждающих конструкциях, которые могут служить каналами утечки речевой информации.

Ключевые результаты работы:

Предложен способ оценки однородности конструкции на основе сравнения сигналов четырех датчиков и вычисления взаимокорреляционной функции.

Разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий автоматизацию процесса сканирования и визуализацию результатов в виде сонограмм и цветовых карт.

Экспериментально подтверждена высокая чувствительность метода: 98% для пустот диаметром от 3 мм, 92% для трещин шириной от 0,3 мм.

Погрешность локализации дефектов не превышает $\pm 1,5$ см, что достаточно для адресного применения защитных мер.

Время обследования типового выделенного помещения (20 м²) сокращено до 40–60 минут.

Дальнейшие исследования предполагают развитие метода в направлении автоматической классификации типов дефектов на основе машинного анализа сонограмм, а также адаптацию метода для обследования многослойных конструкций и конструкций из композитных материалов.

Список литературы:

1. Методические рекомендации по обеспечению звукоизоляции ограждающих конструкций с целью защиты информации, передаваемой речевым способом. – М.: ФСТЭК России, 2018. – 45 с.
2. Подход к оценке неоднородностей в ограждающих конструкциях выделенного помещения / С. Н. Смирнов, А. С. Васильев, С. С. Рыжиков, И. А. Агуреев // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2022. – № 11-2. – С. 146-150. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.11-2.29
3. Патент № 2807009 С1 Российская Федерация, МПК G01H 11/06. Способ и система оценки неоднородностей в ограждающих конструкциях / И. А. Агуреев, С. Н. Смирнов, С. С. Рыжиков, А. С. Васильев. – № 2023106231; заявл. 16.03.2023; опублик. 08.11.2023, Бюл. № 31.

4. ГОСТ 27296-87 (СТ СЭВ 4855-84). Защита от шума в строительстве. Звукоизоляция ограждающих конструкций. Методы измерения. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 27 с.

References:

1. Guidelines for Ensuring Soundproofing of Enclosing Structures to Protect Information Transmitted by Voice. Moscow: FSTEC of Russia, 2018, 45 p.
2. An Approach to Assessing Heterogeneities in Enclosing Structures of a Dedicated Premises / S. N. Smirnov, A. S. Vasiliev, S. S. Ryzhikov, I. A. Agureev // Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences. 2022, No. 11-2, pp. 146-150. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.11-2.29
3. Patent No. 2807009 C1 Russian Federation, IPC G01H 11/06. Method and system for assessing inhomogeneities in enclosing structures / I. A. Agureev, S. N. Smirnov, S. S. Ryzhikov, A. S. Vasiliev. – No. 2023106231; declared. 16.03.2023; published. 08.11.2023, Bulletin No. 31.
4. GOST 27296-87 (ST SEV 4855-84). Noise protection in construction. Soundproofing of enclosing structures. Measurement methods. – Moscow: Publishing House of Standards, 1987. – 27 p.