

УДК 628.511

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В НЕПРЕРЫВНОМ КОНТРОЛЕ ЗАПЫЛЕННОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Евтушенко Сергей Иванович

Д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшего образования Российской Федерации, советник РААСН, член РОМГГиФ, профессор кафедры «Информационные системы, технология и автоматизация строительства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: evtushenkosi@mgsu.ru

Лепихова Виктория Анатольевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность», Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский Политехнический Институт) имени М.И. Платова e-mail: odejnaya@rambler.ru.

Ляшенко Анна Георгиевна

Ведущий инженер-конструктор, ООО «ПИК-МОДУЛЬ», Москва, e-mail: lyashenko.anna022@gmail.com

Андрей Юрьевич Рябоус, студент магистратуры, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) e-mail: erdandrey@yandex.ru

Аннотация: В статье рассмотрены методы по определению запыленности воздуха при производстве строительных материалов. Отмечены достоинства и недостатки таких методов как оптический и радиоизотопный. Для непрерывного контроля за концентрацией пылевого потока в вентиляционных системах выделен как перспективный акустический метод. Основанный на анализе акустического сигнала от взаимодействия движущихся пылевых частиц со стенкой воздуховода. Подробно проанализированы элементы этой информационной цепочки, ее особенности в частотной области и способы выделения полезной информации путем программной обработки на ЭВМ. Рассмотрены особенности акустического сигнала с использованием интеграла Фурье, для получения непрерывного спектра непериодического процесса, содержащего случайную составляющую. Полученные спектры Фурье позволяют осуществить возможность сравнения эффективности различных форм импульсов, так как они имеют важное значение при исследовании ударных процессов частиц пыли со стенкой воздуховода. Использование прямого интегрального преобразования Фурье позволяет выделить частотный спектр, состоящий из основных и тембровых гармоник. Учет тембровых гармоник спектра дает возможность получения достоверной информации о концентрации пылевого потока на предприятиях по производству строительных материалов.

Ключевые слова: строительные материалы, вентиляционные системы, акустический метод, особенности акустического сигнала, интеграл Фурье, частотный спектр, концентрация пылевого потока

FEATURES OF THE ACOUSTIC SIGNAL IN THE CONTINUOUS MONITORING OF DUST IN THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS

Evtushenko Sergey Ivanovich

Doctor of engineering, Professor, honorary worker of higher education of the Russian Federation, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN); Member

of the Russian Society for Soil Mechanics, Geotechnics and Foundation engineering (RSSMGFE), Professor of the Department of Information Systems, Technology and Automation of Construction; National Research University Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia; e-mail: evtushenkosi@mgsu.ru

Lepikhova Victoria Anatolyevna

Ph. D, Associate Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia; e-mail: odejnaya@rambler.ru

Lyashenko Anna Georgievna

Lead structural engineer, PIK Modul LLC, Moscow, Russia; e-mail: lyashenko.anna022@gmail.com

Riabous Andrei YUr'evich

Student, ITMO University; e-mail: erdandrey@yandex.ru

Abstract: The article discusses methods for determining the dustiness of air in the production of building materials. The advantages and disadvantages of such methods as optical and radioisotope are noted. For continuous monitoring of the concentration of dust flow in ventilation systems, acoustic method is singled out as a promising. It's based on the analysis of the acoustic signal from the interaction of moving dust particles with the duct wall. The elements of this information chain, its features in the frequency domain and ways of extracting useful information by computer software processing are analyzed in detail. The features of an acoustic signal using the Fourier integral to obtain a continuous spectrum of a non-periodic process containing a random component are considered. The obtained Fourier spectra make it possible to compare the efficiency of various pulse forms, since they are important in the study of shock processes of dust particles with the duct wall. The use of the direct integral Fourier transform makes it possible to isolate the frequency spectrum consisting of the main and timbre harmonics. Taking into account the timbre harmonics of the spectrum makes it possible to obtain reliable information about the concentration of dust flow at enterprises producing construction materials.

Keywords: building materials, ventilation systems, acoustic method, acoustic signal features, Fourier integral, frequency spectrum, dust flow concentration

Введение

При осуществлении мероприятий по снижению негативных последствий от наличия пыли в рабочей зоне при производстве строительных материалов применяются приборы контроля запыленности в вентиляционных системах. Разработка приборов пылевого контроля является сложной задачей, так как пыль имеет характеристики, изменяющиеся в широком диапазоне. В основе работы приборов контроля лежат различные методы контроля запылённости воздуха [1, 2].

Существует несколько методов измерения пыли: оптический (фотометрический), гравиметрический, пьезобалансный, трибоэлектрический, радиоизотопный. К методам без выделения дисперсной

фазы из аэрозоля относят фотоэлектрические, оптические, акустические, электрические [3, 4].

Так, например если рассмотреть оптический метод измерения пыли (фотометрический и нефелометрический метод), то оптический принцип действия заключается в измерении ослабления интенсивности светового излучения при его прохождении через запыленную среду. Концентрация частиц пыли пропорциональна значению оптической плотности, которая определяется автоматически и представляет собой отрицательный десятичный логарифм коэффициента пропускания. Оптический метод обладает низкой чувствительностью, погрешностью от влияния физико-химических свойств аэрозолей связанной с частой калибровкой прибора, а также необходимостью периодической очистки оптических элементов.

Радиоизотопный метод измерения концентрации пыли основан на свойстве радиоактивного излучения (обычно β -излучения) поглощаться частицами пыли. Массу уловленной пыли определяют по степени ослабления радиоактивного излучения при прохождении его через слой накопленной пыли. Результаты измерения концентрации пыли радиоизотопным методом зависят в некоторой степени от химического и дисперсного состава, что обусловлено особенностью взаимодействия радиоактивного излучения с веществом и нелинейностью зависимости степени поглощения от толщины слоя поглотителя [5, 6].

В настоящее время отечественные приборы, позволяющие производить измерение запыленности воздуха при производстве строительных материалов, имеют ряд недостатков, в частности, характеризуются высокой погрешностью измерений, что обуславливает актуальность модификации существующей приборной базы и разработку новых приборов, в основе которых могут быть заложены иные принципы [7, 8].

Предложенный метод измерения концентрации пылевого потока, путем спектрального анализа акустических сигналов применен, с использованием дискретного быстрого преобразования Фурье. Установлено, в процессе

анализа физического процесса передачи сигналов акустической эмиссии, что диагностический сигнал, представляет собой не собственные колебания частиц пыли при соударениях между собой и с вихрями, порождаемыми несущей средой, а представляет собой вынужденные колебания цепочки передачи сигналов АЭ. Подробно проанализированы элементы этой информационной цепочки, ее особенности в частотной области и способы выделения полезной информации путем программной обработки на ЭВМ. Установлено, что сигналы АЭ представляют исключительно, чувствительный механизм позволяющий идентифицировать источники генерации звукового сигнала и расшифровывать их по количественным и качественным признакам.

Объекты и методы исследования

Рассмотрим особенности акустических сигналов, применяемые для разработки новых принципов и приемов непрерывного контроля запыленности вентиляционного воздуха при производстве строительных материалов.

Основной формой акустического сигнала от технических вибраций упругих тел являются гармонические колебания [9]. В реальных условиях эта чистая форма вибраций встречается редко. Более распространены формы — полигармонические с непрерывным изменением частоты, которые возникают в реальных условиях, например, при разгоне и торможении механизмов. Для описания сложных акустических вибраций будем использовать методы комплексного интегрального преобразования Фурье или Лапласа, заключающиеся в том, что любую периодическую или продолженную периодически зависимость рассматривают как сумму ряда гармонических колебаний (гармоник) с кратными частотами. Чем больше гармоник, тем лучше приближение к аппроксимируемому аудиосигналу.

Параметрами описания механических вибраций являются перемещения, скорости, ускорения, силы, мощности.

Параметрам крутящих вибраций являются углы поворота, угловая скорость, моменты сил, а также фазы, частоты, коэффициенты нелинейных

искажений.

При исследовании полигармонических сигналов целесообразно использовать величины, непосредственно связанные с энергосодержанием колебаний. В большинстве случаев, используя интеграл Фурье, можно получить непрерывный спектр непериодического процесса, содержащий случайную составляющую. Его можно в любой момент времени определить усреднением вероятностных характеристик по множеству выборочных отсчетов, взятых из генеральной совокупности (временного ряда).

Результаты исследований

Среднее значение стационарного случайного процесса постоянно, а его автокорреляционная функция зависит от интервала времени, разделяющего любые два “сечения” процесса. Случайный процесс удобно рассматривать в виде суммы двух вероятностных составляющих — статической и динамической.

Статистическая составляющая $\bar{x}(t)$ определяется как среднее интегральное (в смысле Римана-Стилтьеса) отсчетов временного ряда равное [10]:

$$m_x(t) = \bar{x}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt.$$

Динамическую составляющую определяют по дисперсии процесса D_x , которая характеризует рассеяние возможных реализаций случайной функции $m_x(t)$ относительно среднего значения [10]:

$$\sigma_x^2 = D_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - m_x(t)]^2 dt.$$

Дисперсия по своему физическому смыслу представляет мощность переменных составляющих случайного процесса. Дисперсия характеризует рассеяние в квадратичной мере. Поэтому пользуются среднеквадратичным отклонением [10] для оценки мощности сигнала:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}.$$

Для характеристики случайного процесса в целом пользуются понятиями спектральной плотности мощности или спектра мощности. Спектральная плотность мощности стационарного эргодического случайного процесса, представляющую собой среднюю мощность процесса, приходящуюся на единицу ширины частотной полосы. Распределение средней мощности процесса по частоте называют спектром мощности или энергетическим спектром.

Спектральная плотность мощности стационарного случайного процесса $\sigma_x(f)$ связана и с автокорреляционной функцией $R_x(\tau)$ этого процесса через преобразование Фурье [10]:

$$\sigma_x = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau = 2 \int_0^{+\infty} R_x(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau,$$

где f — полоса частот; τ — время распределения.

Автокорреляционная функция может быть выражена через спектральную плотность мощности с помощью обратного преобразования Фурье [10]:

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_x(f) \cos(2\pi f\tau) df.$$

При установлении законов для мгновенных значений случайного процесса используют понятие функции распределения вероятностей (интегральный закон распределения) и плотность распределения вероятностей случайного процесса (производная от функции распределения). Характер распределения вероятностей случайного процесса и вид кривой плотности распределения служат признаками классификации случайного процесса.

Важное значение при исследовании ударных процессов имеет форма импульса, а спектры Фурье обеспечивают возможность сравнения эффективности различных форм импульсов. Определение частотной функции распределения $F(f)$ может быть получено прямым интегральным преобразованием Фурье $F(t)$ в виде [10,11]:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) \cdot e^{-jft} dt, j = \sqrt{-1}.$$

Процессы, которые связаны с переносом массы, как дискретной, так и континуальной, а также тепловой энергии описываются с использованием высших (тембровых) составляющих спектра. Учет тембровых составляющих спектра позволяет повысить точность и достоверность информации о контролируемом объекте и особенностях протекания исследуемого физического процесса.

Для более обоснованного подхода к разработке акустической спектрально-тембровой методики необходим анализ форм акустических сигналов, описания различного рода частотных распределений гибкой системой математических аппроксимирующих зависимостей [12, 13].

Выводы

Результаты, полученные в процессе обработки акустического сигнала от движущегося пылевого облака в вентиляционных системах образуют основы предложенного спектрально-тембрового метода в пылеметрии и могут легко уточняться путем совершенствования программного обеспечения. Метод открывает практически неограниченные возможности по улучшению метрологичности пылемерного комплекса, сохраняя неизменным инструментальное обеспечение [14, 15].

Необходимо продолжить работу по совершенствованию инструментального и программного обеспечения измерительного комплекса с целью расширения анализа пылевого потока на условия в производственных помещениях, что является важной задачей охраны труда.

Литература

1. Куликова Е.Ю. Оценка современных мероприятий инженерной защиты атмосферы в коммунальном подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2002. № 1 С. 34-40.
2. Чекмарева О.В., Ишанова О.С., Байтелова А.И. Методы оценки источников загрязнения окружающей среды. Методические указания. - Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. - 33 с
3. Фролов А.В., Лепихова В.А., Ляшенко Н.В., Шевченко Н.С. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве. Учебник для вузов / Под общей ред. А.В. Фролова. Москва, 2018. – 586 с.

4. Бондаренко В.А., Евтушенко С.И., Лепихова В.А., Чибишев Н.Н., Версиков С.О. Обеспечение безопасности при чрезвычайных ситуациях. Учебник / Москва, 2020. – 224 с.
5. Евтушенко С.И., Крахмальский Т.А., Фирсов В.В., Лепихова В.А., Кучумов М.А. Новые системы наблюдения и контроля дефектов и повреждений строительных конструкций. Строительство и архитектура. 2020. Т. 8. № 1. С. 11-18.
6. Акустические пылемеры [Электронный ресурс] – 2020 – URL: https://vuzlit.ru/1889546/akusticheskie_pylemery (дата обращения - 05.01.2022)
7. Бондаренко В.А., Евтушенко С.И., Лепихова В.А., Чибишев Н.Н., Версиков С.О., Фирсов В.В. Безопасность жизнедеятельности. Практикум – Учебное пособие / Москва, 2019. – 150 с.
8. Евтушенко С.И., Лепихова В.А., Ляшенко Н.В., Чибишев Н.Н. Повышение пожарной безопасности зданий и сооружений. Строительство и архитектура. 2020. Т. 8. № 4. С. 95-100.
9. Бобков В.П., Грибанов Ю.И. Статистическое измерение в турбулентных потоках. (Физика и техника ядерных реакторов, Вып.36). М.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.
10. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 463с.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968. – 720с.
12. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. – М.: Связь, 1980. – 248 с.
13. Пат.2222807 РФ, МПК – G01 N 29/02. Способ обработки сигналов акустической эмиссии генерируемых дисперсных систем / Пуресев А.И. Торопов О.А.Малых Е.А. Сорокин Н.П. – Заявл. 12.02.01; Оpubл. 27.01.04, Бюл.
14. Evtushenko S.I., Lepikhova V.A., Lyashenko N.V., Skrinnikov E.V. Identification of soils, grounds and lands strata using the acoustic spectral analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" (САТPID-2020). 2020. С. 052043.
15. Осипов Н.А., Рябоус А.Ю., Лепихова В.А., Евтушенко С.И. Диагностика дисперсности пылевых потоков по сигналам акустической эмиссии при строительных работах. Строительство и архитектура. 2022. Т. 10. № 3. С. 51-55.

References:

1. Kulikova E. YU. Ocenka sovremennyh meropriyatij inzhenernoj zashchity atmosfery v kommunal'nom podzemnom stroitel'stve // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2002. № 1 pp. 34-40.
2. Шекмарева О.В., Ишанова О.С., Байтелова А.И. Методы оценки источников загрязнения окружающей среды. Методические указания. - Оренбургский гос. un-т. – Оренбург: OGU, 2019. - 33 p
3. Frolov A.V., Lepihova V.A., Lyashenko N.V., Shevchenko N.S. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti i ohrana truda v stroitel'stve. Uchebnik dlya vuzov / Pod obshchej red. A.V. Frolova. Moskva, 2018. – 586 p.
4. Bondarenko V.A., Evtushenko S.I., Lepihova V.A., Chibinev N.N., Versilov S.O. Obespechenie bezopasnosti pri chrezvychajnyh situacijah. Uchebnik / Moskva, 2020. – 224 p.
5. Evtushenko S.I., Krahmal'nyj T.A., Firsov V.V., Lepihova V.A., Kuchumov M.A. Novye sistemy nablyudeniya i kontrolya defektov i povrezhdenij stroitel'nyh konstrukcij. Stroitel'stvo i arhitektura. 2020. V. 8. № 1. P. 11-18.
6. Akusticheskie pylemery [Elektronnyj resurs] – 2020 – URL: https://vuzlit.ru/1889546/akusticheskie_pylemery (data obrashcheniya - 05.01.2022)

7. Bondarenko V.A., Evtushenko S.I., Lepihova V.A., CHibinev N.N., Versilov S.O., Firsov V.V. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Praktikum – Uchebnoe posobie / Moskva, 2019. – 150 p.
8. Evtushenko S.I., Lepihova V.A., Lyashenko N.V., CHibinev N.N. Povyshenie pozharnoj bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij. Stroitel'stvo i arhitektura. 2020. vol. 8. № 4. P. 95-100
9. Bobkov V.P., Griбанov YU.I. Statisticheskoye izmereniye v turbulentnykh potokakh. (Fizika i tekhnika yadernykh reaktorov, Issue.36). [Statistical measurement in turbulent flows. (Physics and Technology of Nuclear Reactors, Issue 36)] M.: Energoatomizdat, 1988. 168 s.
10. Bendat Dzh., Pirsol A. Izmerenie i analiz sluchajnykh processov / Per. s angl. – M.: Mir, 1974. – 463p.
11. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. – M.: Nauka, 1968. – 720 p.
12. Ahmed N., Rao K.R. Ortogonal'nye preobrazovaniya pri obrabotke cifrovyykh signalov. – M.: Svyaz', 1980. – 248 p.
13. Pat.2222807 RF, MPK – G01 N 29/02. Sposob obrabotki signalov akusticheskoy emissii generiruemykh dispersnykh sistem / Puresev A.I. Toropov O.A. Malyh E.A. Sorokin N.P. – Zayavl. 12.02.01; Opubl. 27.01.04, Byul.
14. Evtushenko S.I., Lepikhova V.A., Lyashenko N.V., Skrinnikov E.V. Identification of soils, grounds and lands strata using the acoustic spectral analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" (CATPID-2020). 2020. C. 052043.
15. Osipov N.A., Riabous A.YU., Lepihova V.A., Evtushenko S.I. Diagnostika dispersnosti pylevykh potokov po signalam akusticheskoy emissii pri stroitel'nykh rabotah. Stroitel'stvo i arhitektura. 2022. vol. 10. № 3. P. 51-55.