

**БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)****Диагностика дисперсности пылевых потоков по сигналам акустической эмиссии при строительных работах**

УДК 504.064.3:628.511

Осипов Никита Алексеевич

Кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»
e-mail: nikita@ifmo.spb.ru

Андрей Юрьевич Рябоус

Студент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»
e-mail: erdandrey@yandex.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

Евтушенко Сергей Иванович

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

Статья получена: 05.09.2022. Рассмотрена: 20.09.2022. Одобрена: 27.09.2022. Опубликовано онлайн: 27.09.2022. © РИОР

DIAGNOSTICS OF DUST FLOW DISPERSITY BY ACOUSTIC EMISSION SIGNALS DURING CONSTRUCTION WORKS**Osipov Nikita Alekseevich**

Ph. D, Associate Professor, ITMO University;
e-mail: nikita@ifmo.spb.ru

Riabous Andrei Iurevich

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

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

Abstract: A brief overview of existing approaches to the determination of the dispersed composition of dust during construction works with the definition of the most promising method is presented. The

existing methods are divided into methods with pre-deposition, and without. Methods with pre-deposition require a lot of time and are used mainly for laboratory studies. Methods without pre-deposition make it possible to conduct measurements in real time, which distinguishes them favorably from the methods described above during construction works. One of these methods is acoustic, which also provides the possibility of non-destructive testing and is based on the registration of acoustic emission signals that occur during natural or forced vibration excitation of the systems being diagnosed.

When analyzing the physical parameters of the dust flow, it was determined that the key signals are AE, which can be presented in the form of diagnostic amplitude-frequency Fourier spectra containing information about the fractional composition and concentrations of the dust and gas flow. From this spectrum, subspectrums corresponding to the selected intervals of dispersion and dust concentration are further distinguished.

The resulting algorithm is applied first for reference dust carvings in order to form a data bank, on the basis of which further determination of the dust composition is made.

This method requires the availability of special software, which currently exists in the form of a prototype, and, accordingly, needs further refinement.

Keywords: dispersed dust composition, methods with pre-deposition, methods without pre-deposition, acoustic signal, acoustic emission, Fourier spectrum

Аннотация: Представлен краткий обзор существующих подходов к определению дисперсного состава пыли при строительных работах с определением наиболее перспективного метода. Существующие методы делятся на методы с предварительным осаждением, и без. Методы с предварительным осаждением требуют достаточно много времени и используются, в основном, для лабораторных исследований. Методы без предварительного осаждения дают возможность вести измерения в режиме реального времени, что выгодно отличает их от вышеописанных методов при строительных работах. Один из таких методов – акустический, обеспечивающий так же возможность неразрушающего контроля и использующий в своей основе регистрацию сигналов акустической эмиссии, возникающей при естественном или вынужденном вибровозбуждении диагностируемых систем.

При анализе физических параметров потока пыли было определено, что, ключевыми являются сигналы АЭ, которые могут быть представлены в виде диагностических амплитудно-частотных спектров Фурье, содержащих информацию о фракционном составе и концентрациях пылегазового потока. Из данного спектра, далее выделяются подспектры соответствующие выбранным интервалам дисперсности и концентрации пыли.

Полученный алгоритм применяется сначала для эталонных навесок пыли с целью сформировать банк данных, на основе которого и производится дальнейшее определение состава пыли.

Данный метод требует наличие специального программного обеспечения, которое существует на данный момент в форме прототипа, и соответственно, нуждается в дальнейшей доработке.

Ключевые слова: дисперсный состав пыли, методы с предварительным осаждением, методы без предварительного осаждения, акустический сигнал, акустическая эмиссия, спектр Фурье

Введение

Промышленная пыль - витающие в воздухе рабочей зоны при строительных работах и медленно оседающие твердые частицы размерами от нескольких десятков до долей микрометра. Пыль представляет собой аэрозоль, в котором воздух является дисперсионной средой, а твердые частицы - дисперсной фазой.

Число производств, где неизбежно интенсивное пылевыведение довольно велико. Так, наиболее пы-

леопасными можно считать многие операции на предприятиях горнодобывающей и угольной промышленности, в машиностроении, в фарфорофаянсовой, текстильной, мукомольной промышленности, а также при большинстве строительных работ. [1].

Пыль технологического происхождения характеризуется большим разнообразием параметров: химическому составу, размеру и строению частиц, плотностью, удельной поверхностью, верхнему и нижнему концентрационному пределу взрывоопасности, электрическими свойствами и т.д. [1].

Под влиянием пыли развивается целый ряд самых разнообразных заболеваний, таких как пневмокониозы — фиброз легочной ткани, пневмонии, бронхиты, бронхиальная астма, поражение слизистой носа и носоглотки, поражения кожи. Некоторые виды пыли имеют так же канцерогенное воздействие [2].

Существуют нормативные документы, определяющие предельно допустимые концентрации пыли в зависимости от типа производства, работ. Так, например, ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений должно составлять не более 0,5 мг/м³ [3]

Для контроля эффективности работы пылеочистных устройств, которые борются с промышленной пылью, используются методы определения дисперсного состава пыли.

Многие из существующих методов определения дисперсного состава пыли при строительных работах достаточно сложны, неавтоматизированны и не всегда обеспечивают непрерывное слежение. Однако существуют методы, допускающие или же подразумевающие использование в своём составе инфокоммуникационные системы, которые значительно повысят эффективность данных методологий.

Поэтому рассмотрение существующих методов, определение их достоинств и недостатков, а также рассмотрение возможности автоматизации некоторых методов или в целом, вопроса разработки специализированного программного обеспечения, является актуальным вопросом.

Цель исследования

Основные задачи данной работы — определение наиболее перспективной методологии определения дисперсного состава воздуха, для которой необходима разработка\доработка текущей программной системы и изучение его физического и математического аппарата для дальнейшей разработки программной системы.

Для этого соответственно будут изучены существующие методологии оценки дисперсного состава воздуха при строительных работах и определена наиболее перспективная, которая, к тому же, могут быть улучшены путём создания инфокоммуникационной системы. Для неё будут рассмотрены основные физические параметры и математический аппарат.

Материал и методы исследования

Существующие методы дисперсного анализа разделяются на две группы: методы с предварительным осаждением и выделением пробы анализируемой пыли и методы без предварительного отбора пробы.

К основным методам с предварительным осаждением и выделением пробы анализируемой пыли следует отнести такие методы как:

- микроскопический анализ – рассмотрение частиц пыли с использованием оптического или электронного микроскопа, определение формы и размера частиц и их количества по фракциям;

- ситовый анализ – разделение частиц на фракции путём последовательного просеивания навески пыли через лабораторные сита с отверстиями различных размеров [4];

- седиментометрия – разделение навески пыли на фракции путём её осаждения в жидкой или газообразной среде [5];

- центробежная сепарация – разделение пыли на фракции с помощью центробежной силы в специальном аппарате.[6]

Методы определения дисперсности пыли без предварительного осаждения и выделения навески позволяют определять состав воздуха в режиме реального времени. К таким методам относятся следующие:

- аэродинамические методы, основанные на выделении частиц дисперсной фазы во вращающемся воздушном потоке под влиянием инерционных сил (в основном центробежных)

- метод ультрамикроскопии основан на наблюдении за частицами дисперсных систем в темном поле, которое создается при боковом освещении.

- радиоизотопный метод. Принцип работы данных приборов заключается в просасывании воздуха через фильтр, расположенный между источником радиоактивного излучения и детектором этого излучения.

- акустические методы основаны на измерении параметров акустического поля при наличии частиц

пыли в пространстве между источником и приемником звука.

Результаты исследования и их обсуждение

Вопрос изучения дисперсного состава воздуха с целью обеспечения безопасности на производствах и стройках, разумеется, был актуален задолго до активного развития информационных технологий. Были разработаны и введены в эксплуатацию различные методологии и приборы, позволяющие определять состав пыли, однако чаще всего это были методы с предварительным осаждением, и изучение полученного навеска проводилось уже в лабораторных условиях.

Позже были предложены методы определения дисперсного состава воздуха без предварительного осаждения, которые, вне всяких сомнений являются технически сложными, но и более перспективными.

Развитие и последующее широкое применение информационных технологий позволило частично автоматизировать часть существующих методов, а также открыло перспективы развития новых, реализация которых без применения специальных программ была слишком трудоёмкой или даже невозможной.

Кратко рассмотрим существующие методы дисперсного анализа пыли, выделим их достоинства и недостатки.

Микроскопический анализ. Данный метод позволяет определить размер и форму пылевых частиц, их количество, сделать микрофотографии пыли.

Для рассмотрения под оптическим микроскопом готовят препараты по методу осветления. Запыленный фильтр из специализированного материала подвергают воздействию паров растворителя, например, ацетона. Материал фильтра расплавляется, образуя прозрачную пленку, и фиксирует частицы пыли.

Пылевые частицы измеряют с помощью окулярной микрометрической линейки микроскопа. Дисперсный состав пыли находят, измеряя частицы и определяя количество частиц каждой фракции. Метод микроскопии трудоемок; его применяют, в основном, при выполнении научных исследований. Для ряда видов пыли он является единственно возможным.

Ситовый анализ является наиболее простым методом определения дисперсного состава пыли. Он

основан на механическом разделении частиц по крупности. Материал загружается на сито с ячейками известного размера и путем встряхивания, постукивания, вибрации или другими способами разделяется на две части — остаток и проход.

Просеивая материал через набор различных сит, можно разделить пробу на несколько фракций. Размеры частиц этих фракций ограничены размерами отверстий используемых в анализе сит. Под размером отверстия сит обычно понимают длину стороны квадратной ячейки. [4]

Ситовый анализ применяют, как правило, для исследования грубой пыли, в которой масса частиц мельче 100 мкм составляет не более 10 %. При этом не представляется возможным определить дисперсный состав пыли в области мелких фракций, которые представляют наибольшую опасность.

Седиментационный анализ — совокупность методов дисперсионного (гранулометрического) анализа, в основе которых лежит зависимость между размером (массой) и скоростью движения тела в вязкой среде (газе или жидкости) под действием гравитационных или центробежных сил. Процесс оседания частиц под действием силы тяжести и называется седиментацией.

Зависимость времени осаждения пылевых частиц в жидкой среде от их размеров позволяет путём расчётов определять эквивалентный диаметр частиц, содержащихся в пробе. А последовательное взвешивание остатка позволяет определить процентное содержание частиц того или иного размера в пробе пыли.

Седиментометрические методы применяют для анализа дисперсного состава пыли, уловленной пылеочистой аппаратурой, или проб пыли отобранных из газоходов или воздухопроводов.

Метод центробежной сепарации. Последовательное отделение фракций от исследуемой навески пыли осуществляется под действием центробежной силы. Если в методе седиментометрии используется сила тяжести, то в данном случае применяется центробежная сила, создаваемая аппаратурой.

Данный метод имеет ряд недостатков — он неприменим для анализа слипающихся и волокнистых пылей, так как они забивают камеру деления прибора и препятствуют его работе. Так же к минусам стоит отнести недостаточную полноту отвеивания порошкообразного материала и, как следствие, получение заниженного процентного содержания тонких фракций. Поэтому метод рекомендуется применять

в основном для определения дисперсного состава крупных фракций.

В аэродинамических методах выделение частиц дисперсной фазы происходит во вращающемся воздушном потоке под влиянием инерционных сил (в основном центробежной). В этих приборах дисперсная фаза не делится на фракции. Из воздушной среды одновременно выделяются все фракции. Поэтому в каждом из этих методов применяется специфическая методика расчета распределения частиц на фракции, основанная на теоретических или экспериментальных зависимостях. В некоторых случаях этот расчет заменяется специальной тарировкой показаний прибора при заданных режимах его воздушной нагрузки [7].

Акустические методы основаны на измерении параметров акустического поля при наличии частиц пыли в пространстве между источником и приемником звука. Из акустических методов более часто применяют метод поглощения. Влияние взвешенных частиц ведет к потере ультразвуковой энергии, которые зависят от ряда физических параметров, таких как радиус частиц, их концентрация, а также скорость и частота ультразвука в пылегазовой среде. При этом определяют поглощение ультразвука одной и той же системой в чистом и запылённом воздухе и находят разницу полученных значений [8].

Из существующих акустических методов оценки дисперсности пыли остановимся на методе, использующем акустическую эмиссию. Его суть заключается в использовании сигналов АЭ, возникающей при естественном или вынужденном вибровозбуждении диагностируемых систем.

В ходе исследования физического процесса пылепереноса было установлено, что в сигналах акустической эмиссии мы слышим не “голос” каждой частицы пыли (их частота слишком велика) и не “хор” частиц пыли входящих в облако. Возбужденные пылевые частицы являются медиаторами сигнала АЭ, возбуждающими в механической цепочке передачи сигнала более низкочастотные колебания информационного сигнала (который будет в дальнейшем разложен на диагностические амплитудно-частотные спектры Фурье) идущего от цепочки передачи. Сама цепочка выглядит следующим образом: (облако пыли — пограничный слой — стенка — пылепровод — датчик) и расположена в диапазоне частот от 0 до 60 kHz.

Акустический сигнал (АС) от частиц пылевого облака в вентиляционном потоке, как всякий со-

ставной звуковой сигнал, состоит из периодических компонент. Разложение АС на элементарные составляющие должно обеспечивать однозначное соответствие пофракционных концентраций интервалов дисперсности пыли и отображать диагностическую роль этих интервалов в формировании акустического сигнала.

Оптимальным методом для данной операции было выбрано дискретное быстрое преобразование Фурье. Так осуществляется переход от физических параметров потока к параметрам частотно-амплитудного энергетического спектра, полученного из временного ряда отсчетов, сигнала.

Для каждой монофракции пыли, в зависимости от объёма и массы частиц, путём измерений получается свой подспектр частот. Полученные данные обрабатываются, формируя банк данных для каждого класса дисперсности.

Соответственно, при анализе дисперсности пыли, полученные результаты сверяются с банком данных, после чего для каждого выделенного подспектра находят удельную концентрацию данного интервала дисперсности [9, 10].

Данный метод обладает большей информативностью, чем традиционные методы технической диагностики, хотя и имеет повышенные требования к необходимому оборудованию и программному обеспечению (включая формирование базы данных эталонных спектров).

Помимо этого, еще в ходе сбора информации, поступающих от датчиков, возникает необходимость преобразования сигналов в числовую форму с последующей обработкой на ЭВМ, а также возникающие в процессе эксперимента и его обработки, необходимости фильтрации экспериментальной информации полосовыми фильтрами, сглаживания информации, ее компрессия и специализированные методы, позволяющие выделить ведущие компоненты сигнала. В связи с изложенным выше, возникла необходимость сбора и создания пакета прикладных программ для текущей обработки и интерпретации диагностических сигналов. Комплекс программного обеспечения, разработанный для обеспечения работы данной методологии, является всего лишь прототипом, требующим значительной доработки, как с точки зрения функционала, так и с точки зрения пользовательского интерфейса. Что, в свою очередь ставит цель разработать соответствующий комплекс программного обеспечения для поддержания работоспособности этого метода.

Выводы

Были рассмотрены основные методологии исследования дисперсного состава пыли, использующиеся в наши дни. Данные методы можно разделить на две большие подгруппы — с предварительным осаждением пыли и без.

В ходе исследования было выяснено, что методы с предварительным осаждением требуют значительного времени и больше актуальны для разовых лабораторных исследований, чем для непрерывного и постоянного контроля уровня запылённости. Методы без предварительного осаждения позволяют вести наблюдение в режиме реального времени, однако требуют значительно более сложной аппаратуры и её тонкой настройки. К тому же, многие из этих методов требуют быстрой обработки больших объёмов данных, что подразумевает использование специального программного оборудования.

Из всех рассмотренных методов наиболее актуальным при строительных работах был признан метод на основе изучения сигналов акустической эмиссии, поскольку он позволяет производить неразрушающий контроль и анализ дисперсного потока в режиме реального времени.

На основе анализа физических параметров потока пыли были выделены ключевые факторы, влияющие на формирование диагностических акустических сигналов, а также были определены характерные особенности спектра акустических сигналов, которые можно выделить в явлении акустической эмиссии.

То есть, ключевыми в данной методологии являются зарегистрированные сигналы АЭ, которые можно представить в виде диагностических амплитудно-частотных спектров Фурье. А данные спектры в свою очередь содержат информацию о фракционном составе и концентрациях пылегазового потока. Таким образом, искомая информация выделяется из акустического сигнала путём разложения его в спектр Фурье, а затем разложения полученного спектра Фурье на подспектры, которые будут соответствовать выбранным интервалам дисперсности и концентрации пыли после дополнительного уточнения.

Принцип работы алгоритма может быть поделён на два этапа — первый это формирования банка данных, путём применения метода для эталонных навесок пыли, а второй этап — это, соответственно, определение состава пыли на реальных данных, используя подготовленные эталонные данные.

Однако описанный метод требует наличия специального программного оборудования, а существующий на данный момент прототип нуждается в дальнейшей доработке.

Литература

1. Промышленная пыль [Электронный ресурс] – 2019 – URL: http://www.f-med.ru/toksikologia/prom_pil.php (дата обращения - 28.12.2021)
2. Производственная пыль [Электронный ресурс] – 2021 – URL: <http://prom-nadzor.ru/content/proizvodstvennaya-ryl> (дата обращения - 28.12.2021)
3. СанПиН 2.2.3.1384-03. 2.2.3. Гигиена труда. Предприятия отдельных отраслей промышленности, сельского хозяйства, связи. Гигиенические требования к организации строительного производства и строительных работ. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы
4. 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.
5. Пиура В.И. Определение фракционного состава и размера частиц порошка мела методом седиментации. – КГТУ – Краснодар, 2016. – 6 с.
6. Куренкова Г.В., Жукова Е.В., Лемешевская Е.П. Пыль как вредный фактор производственной среды. Учебное пособие. – Иркутск: ИГМУ, 2015. 88 с.
7. Санитарно-химический контроль состояния воздушной среды [Электронный ресурс] – 2017 – URL: https://bstudy.net/952654/ekonomika/sanitarno_himicheskiy_kontrol_sostoyaniya_vozdushnoy_sredy (дата обращения - 29.12.2021)
8. Акустические пылемеры [Электронный ресурс] – 2020 – URL: https://vuzlit.ru/1889546/akusticheskie_pylemery (дата обращения - 05.01.2022)
9. Лепихова В.А. Метод неразрушающего контроля дисперсных систем пылеочистительных устройств. - Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. - Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2018. - С. 32-36
10. Лепихова В.А., Пикина Е.В. Спектрально-тембровая методология дисперсного анализа угольной пыли в вентиляционных системах. - Актуальные проблемы геологии, горного и нефтегазового дела: сб. науч. тр. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т им. М.И. Платова. - Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2017. - С. 108-113