

# Компьютерные модели, автоматизированная информационная и экспертная системы мониторинга аэрогидрозольных потоков акустическим методом в промышленности и строительстве

А.Ю. Рябоус, К.З. Билятдинов, В.А. Лепихова

**Аннотация** — Представлены инновационные подходы к совершенствованию информационного обеспечения мониторинга дисперсных систем с использованием акустических методов. Практическая значимость основана на том, что сегодня применение спектрально акустического метода позволяет с достаточно высокой точностью определять дисперсный состав аэрогидрозольных потоков. Для обеспечения эффективного применения данного метода предлагается разработать информационную экспертную систему мониторинга. Экспертная система представляет собой комплексное программное обеспечение, состоящее из банка данных и вспомогательных подпрограмм осуществляющих решение поставленных задач и взаимодействия с пользователем. Применяемый спектрально-акустический метод основывается на принципах акустической эмиссии, при котором датчики регистрируют продуцируемые частицами исследуемого вещества в воздушном или жидкостном потоке звуковые колебания. Разложение полученного звукового файла в спектр позволяет определить состав исследуемой смеси. Для получения наиболее точных результатов было принято решение воспользоваться методами компьютерного моделирования, для генерации тестовых файлов и проверки работоспособности метода. Для этого обоснованы функциональные требования к экспертной системе. Определена архитектура экспертной системы. Для целей практического применения сформулирована общая задача по разработке экспертной системы на основе исследования и систематизации информационных процессов мониторинга, а так же для формирования компьютерной модели с определением ключевых частей экспертной системы.

**Ключевые слова** — акустическая эмиссия, быстрое преобразование Фурье, информационная и экспертная системы, компьютерное моделирование, мониторинг, спектрально-акустический метод.

Статья получена 27 сентября 2023

А.Ю. Рябоус – аспирант, ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (email: erdandrey@yandex.ru).  
К.З. Билятдинов – к.в.н., доцент ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (email: k74b@mail.ru).  
В.А. Лепихова – к.т.н., доцент ЮРГПУ НПИ имени М.И. Платова (email: odejnaya@rambler.ru).

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие предприятий и производств влечёт за собой соответствующее увеличение количества и качества информационных и экспертных систем мониторинга, обеспечивающих безопасность труда и соблюдение нормативных актов.

Важнейшей и востребованной сферой применения данных систем является определение дисперсного состава примесей в воздушных и водных потоках (вентиляция, сточные воды производств) поскольку это напрямую связано с безопасностью производств, как с точки зрения работников, так и со стороны влияния на экологию.

Так одной из решаемых задач является внедрение автоматизированных информационных и экспертных систем мониторинга для определения дисперсного состава пыли на производствах.

Информационная система представляет собой совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств [1]; и тем самым их применение позволяет эффективно анализировать состояние и качество воздуха на предприятиях.

Промышленная пыль это взвесь твёрдых частиц в воздухе рабочих помещений. Твёрдые частицы, имеющие размер от десятков до долей микрометра являются дисперсной фазой аэрозоля, а сам воздух в промышленных помещениях – дисперсионной средой аэрозоля.

Пылеопасных, или же производств с высокой концентрацией и выделением пыли, достаточно много. Разумеется, наиболее опасными с этой точки зрения являются шахты, горнодобывающая и угольная промышленность, однако некоторые отрасли машиностроения, такие как литейные цеха, шлифовальные работы, а так же текстильные и мукомольные производства так же представляют опасность.

Помимо очевидных характеристик, таких как размер частиц и концентрация, промышленная пыль может отличаться и по ряду других, не менее важных параметров. Это в первую очередь химический состав, строение и плотность частиц, их структура,

концентрационный предел взрывоопасности, возможность электризации и другие [2].

Влияние пыли на организм человека, разумеется, зависит от самой пыли, однако в любом случае оно будет негативным. Так, при постоянном контакте с пылью у человека может развиваться целый спектр различных лёгочных болезней – фиброзы лёгких, бронхиты, пневмония, астма, поражения слизистой и кожи. В некоторых случаях пыль может так же быть фактором возникновения злокачественных опухолей [3].

Разумеется, это должно учитываться на производствах, поэтому допустимые концентрации вредных веществ в воздухе изучены и законодательно определены [4].

Таким образом, ключевой задачей разработки и внедрения автоматизированной информационной и экспертной компьютерной системы определения концентрации и дисперсного состава примесей в воздухе будет являться выявление соответствия их нормативам и требованиями безопасности.

Существующая задача определения дисперсного состава пыли имеет ряд различных решений, все из которых имеют свои плюсы и минусы, однако в данной статье рассматривается возможность использования методов компьютерного моделирования для решения данной задачи, а так же применение спектрально-акустического метода.

Компьютерное моделирование выполняют с целью получения данных, необходимых для принятия решений в процессах разработки, проектирования, производства и сопровождения программного продукта и в случае описываемой системы моделирование будет применено для формирования имитационных звуковых сигналов, которые могут быть получены при анализе дисперсного потока [5].

Это означает, что основной задачей является проектирование и разработка экспертной информационной системы, которая будет получать данные с приборов и, применяя спектрально-акустический метод для обработки полученной информации, будет выполнять определение состава дисперсного потока. При этом в начале процесса мониторинга вместо данных с регистрирующих устройств будут применены имитационные компьютерные модели, что позволит существенно сократить расходы и время на настройку и тестирование системы в различных режимах и при смене условий и мест эксплуатации.

В основе используемого в системе метода лежит применение сигналов акустической эмиссии, возникающих при соударениях частиц пыли между собой и стенками вентиляции. Далее полученный сигнал принимается аппаратурой, усиливается и преобразовывается в элементарные составляющие. В зависимости от размеров, массы и материала частиц, получается свой, индивидуальный спектр частот. Полученные спектры сравниваются с эталонными результатами из специальной базы данных и точно устанавливаются размеры и концентрации пыли в воздушном потоке [6].

В связи с эти сегодня необходимы инновационные решения для повышения эффективности информационного обеспечения применения данного

метода в промышленности и в строительстве. Поэтому, было решено воспользоваться методами компьютерного моделирования и начать проектирование рабочей модели экспертной системы по определению дисперсного состава пыли.

## II. ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ И ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

Экспертные системы представляют собой сложные программные комплексы, содержащие знания специалистов (экспертов) в конкретных областях и передающие этот опыт для помощи менее квалифицированным пользователям [7].

В исследуемой предметной области предлагается использовать «классическое» описание процесса работы экспертной системы (ЭС) в виде двух этапов:

1 этап. Пользователь подготавливает запрос и обращаться с эти запросом в ЭС.

2 этап. ЭС с помощью соответствующей базы знаний (БЗ) выдаёт требуемое решение (ответ).

На рисунке 1 показана обобщённая структура экспертной системы.

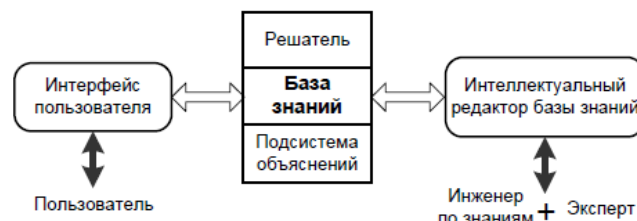


Рис. 1 – Структура экспертной системы

В составе разрабатываемой ЭС будут присутствовать следующие элементы:

1. Интерфейс пользователя представляет собой комплекс программ, ответственных за непосредственное взаимодействие как пользователя с системой (ввод информации), так и вывод конечных результатов после обработки запроса.
2. База знаний это ключевой элемент экспертной системы, содержащий в себе совокупность знаний предметной области, в системе представлена обычно в виде базы данных, однако так же зачастую осуществляется и визуализация имеющейся информации в форме, понятной и пользователю и эксперту с целью упрощения работы с системой.
3. “Решатель” фактически представляет собой бизнес логику системы и отвечает за поиск ответа на вопрос на основе информации из базы знаний.
4. Подсистемой объяснений фактически называются вспомогательные элементы системы, разъясняющие процесс получения решения с использованием базы знаний.
5. Интеллектуальный редактор базы знаний это подпрограмма системы предназначенная, как можно понять из её названия для редактирования и дополнения существующей базы знаний. Данный элемент системы не предназначен для конечных пользователей, его задача обеспечить комфортное обслуживание и актуализацию системы со стороны обслуживающего персонала

– инженера по знаниям и эксперта.

Предлагаемый состав экспертной системы является минимальным необходимым, то есть в случае с промышленными прикладными системами схема может быть в значительной мере усложнена [8].

Экспертные системы можно подразделить на две категории – системы, решающие задачи анализа (интерпретация данных, диагностика, поддержка принятия решения) и решающие задачи синтеза (проектирование, планирование, управление). В первом случае набор возможных решений может быть заранее описан в базе знаний и включён в систему, в то время как задача синтеза подразумевает генерацию новых вариантов решений и их количество, фактически, неограниченно и строится путем комбинирования компонентов или подпроблем. Некоторые задачи (обучение, мониторинг, прогнозирование) сочетают в себе как анализ, так и синтез решения.

В случае же рассматриваемой экспертной системы мониторинга аэрогидрозольных потоков акустическим методом, решаемую ей проблему можно отнести к смешанной, так как с одной стороны она подразумевает непрерывный мониторинг дисперсного потока, что включает в себя преобразование входных звуковых данных с помощью математических операций, что несомненно относится к задаче синтеза, но в то же время разложение полученного сигнала происходит в соответствии с определёнными правилами, заложенными в банке данных (об этом будет рассказано далее), что является аналитической задачей.

Проектирования и разработка экспертной системы представляет собой комплексный процесс, состоящий из ряда этапов. Одним из таких этапов является применение компьютерного моделирования с целью имитации работы вентиляции и приборов учёта звукового сигнала дисперсного потока для получения тестовых звуковых образцов для дальнейшего анализа в системе.

Как известно моделирование это метод научного исследования явлений, объектов или систем, основанный на построении и применении моделей с целью анализа объектов исследований или управления ими.

При моделировании прослеживается процесс замещения реального объекта с помощью объектно-модели с целью изучения субъектом реального объекта или передачи информации о свойствах реального объекта [9]. Это может быть полезно в различных случаях, в том числе, когда изучение реального объекта или явления труднодоступно или требует привлечения значительных технических средств, что так же может быть достаточно затруднительно.

Таким образом, сама разработка компьютерной модели будет состоять из двух этапов – изучение физических основ работы акустического метода и изучение математического аппарата, а затем разработку и реализацию соответствующей компьютерной модели.

### III. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА, ИСПОЛЪЗУЕМОГО В РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ

Фактически именно данный метод и будет реализован в элементе бизнес-логики будущей экспертной системы.

Акустическая эмиссия (АЭ) это явление возникновения и распространения акустических волн (упругих колебаний) в средах при различных процессах, таких как деформации, столкновения частиц, истечение жидкостей и газов и другое. На основе данного физического явления была разработана одноимённая техническая диагностика [10].

То есть акустические методы позволяют установить корреляции между возникающими сигналами АЭ и происходящими в материалах (объектах исследования) физическими процессами.

Воздушный поток с частицами пыли имеет ряд различных физических параметров, которые напрямую влияют на сигналы акустической эмиссии. Поскольку пылегазовый поток это сложная система, логично предположить, что акустический сигнал в данной системе имеет несколько источников, которые перечислены ниже:

Собственные акустические сигналы частиц

Серии импульсов, получаемые при соударении частиц пыли со стенками вентиляционных шахт и датчиком.

Соударения частиц пыли в потоке, вызванные турбулентными вихрями в движущейся среде.

Согласно динамической теории упругости собственные акустические сигналы не представляют большого интереса в рамках данного метода [11].

Это вызвано следующими особенностями собственного акустического сигнала пылевых частиц:

— собственные колебания частиц пыли происходят на частотах, много больших чем исследуемый диапазон сигнала

— мощность данных колебаний ничтожна

— вероятность данных колебаний попасть в цепочку передачи сигналов акустической эмиссии так же невелика

В то же время второй и третий источники акустических сигналов, указанные выше имеют ряд следующих параметров:

— плотности распределения масс, скоростей и мощностей, движущихся в воздушном потоке частиц пыли, позволяют точно определить параметры акустического сигнала в процессе измерений.

— согласно теореме единственности [12] можно утверждать о независимости отдельных осцилляций, согласно которым полученный сигнал будет разлагаться в спектр Фурье.

— все элементарные составляющие полученного спектра будут содержать необходимую информацию, позволяющую после ряда преобразований получить требуемую информацию о составе пыли.

### IV. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ПОДХОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Описываемые выше факты и соответствующие логические выкладки актуальны и были доказаны в ходе испытаний, однако требуют структуризации и перевода в более строгий формат в виде математического аппарата. Это необходимо для создания базиса метода, которая в дальнейшем будет применена для создания компьютерных моделей и последующих испытаний. Поскольку проведение экспериментов с реальными образцами требует специфического оборудования, было решено первый этап испытаний проводить с

применением методов компьютерного моделирования для формирования тестовых образцов.

Таким образом, если рассматривать происходящее с точки зрения акустики, то взаимодействия частиц пыли между собой и стенками вентиляции порождают комплексный звуковой сигнал, состоящий из множества сигналов, которые, в свою очередь являют собой передачу энергии звуковых колебаний элементов системы.

Считываемый сигнал представляется в виде временной последовательности импульсов и после обработки представляет собой частотный спектр Фурье, из которого могут быть получены основная и кратные ей высшие гармоники, которые будут содержать необходимую информацию об исследуемом потоке.

Разрешающую способность измерительного тракта в первую очередь обеспечивают именно высшие гармоники исследуемого акустического сигнала.

К примеру, первая основная частотная гармоника воздушной части потока будет отличаться на  $\Delta$  от основной гармонии пылевой части потока

$$f_n = f_a + \Delta. \quad (1)$$

И в случае, описанном в формуле (1) высшие гармоники, которые будут всегда кратны основным, будут отличаться уже на  $k \times \Delta$  т.е.

$$|f_a + \Delta| \times k = f_a \times k + \Delta \times k, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициенты кратности тембровых гармоник;  $f_a$  — осредненная частота для чистой газовой среды;  $f_n$  — частота звучания твердой пылевой фазы.

Исходя из выражения (2) получается, что ключевыми носителями информации являются высшие гармоники спектра. Использование их поможет выделять сигналы акустической эмиссии от чистой газовой среды и, тем самым можно будет получить подробную информацию о необходимых параметрах пылегазового потока.

Как любой другой звуковой сигнал, акустический сигнал (АС) регистрируемый от частиц пыли в шахте вентиляции, может быть представлен в виде периодических компонент. Выбор правильной математической модели для разложения сигнала на составляющие для дальнейшего дисперсного анализа, это очень важная часть исследования.

Так, она должна четко и однозначно демонстрировать соответствие фракционных концентраций интервалов дисперсности, а так же демонстрировать диагностическую роль этих интервалов при формировании спектра.

Указанным требованиям у какой-то мере удовлетворяют сразу три математические модели.

Так, например одним из подходящих методов будет разложение сигнала на гармонические ортогональные составляющие, которые будут образовывать искомый спектр, состоящий их основных и кратных им высших тембровых гармоник.

В то же время разложение того же сигнала в ряд Котельникова, благодаря высокой точности операции может обеспечить корректное выполнение задачи и так же отлично подойдет для описания сигнала [13].

Однако, с точки зрения пылеметрии, наиболее перспективным вариантом является разложение

акустического сигнала на компоненты при помощи интегрального преобразования Фурье-Лапласа [14].

Для того чтобы сохранить необходимую точность аппроксимации при использовании выбранной математической модели по определению пофракционных концентраций, при разложении сигнала в спектр Фурье оставляется необходимое число значимых тембровых гармоник. То есть, определением количества значимых гармоник учитываемых в спектре, можно управлять требуемой точностью исследования

Таким образом, переход от электрического сигнала, считанного с датчиков и несущего информацию о физических параметрах, к параметрам энергетического амплитудно-частотного спектра на основе временного ряда отсчетов выполняется при помощи дискретного быстрого преобразования Фурье (3):

$$U(t) = \sum_{k=-\infty}^{-1} (C_k \cdot \cos 2\pi f_k \cdot t + S_k \cdot \sin 2\pi f_k \cdot t) + \frac{C_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} (C_k \cdot \cos 2\pi f_k \cdot t + S_k \cdot \sin 2\pi f_k \cdot t), \quad (3)$$

где  $f_k = k \cdot f = \frac{k}{T}$ ,  $k = -\infty \dots -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, \dots +\infty$ .

## V. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование гипотетического звукового сигнала, предлагается применять для анализа при помощи вышеописанного метода.

Так как амплитуды и частоты получаемого акустического спектра Фурье содержат информацию о дисперсном составе пыли в потоке.

Причем первая гармоника ряда Фурье будет означать концентрацию отдельно взятой фракции пыли, а последующие тембровые, кратные основной гармонике так же несут информацию об источниках пыли.

Таким образом, первоочередной задачей разрабатываемой экспертной системы является обработка полученного цифрового сигнала и выделение из него основной и тембровых гармоник с целью определения дисперсного состава пыли.

В связи с этим было решено создать модель, демонстрирующую процесс разложения входного сигнала в спектр Фурье, с выделением основной и тембровых гармоник.

Была создана программа в MATLAB, генерирующая сигнал на основе нескольких синусоид, а так же добавления произвольных шумов. Далее полученный сигнал подвергается быстрому преобразованию Фурье с целью выделения гармоник. В реальной ситуации первая гармоника обозначала бы концентрацию фракции пыли, а остальные показывали бы состав, однако в данном случае будут выделены сигналы заданных синусоид.

В результате выполнения данной программы были получены следующие графики (рисунки 1 и 2).

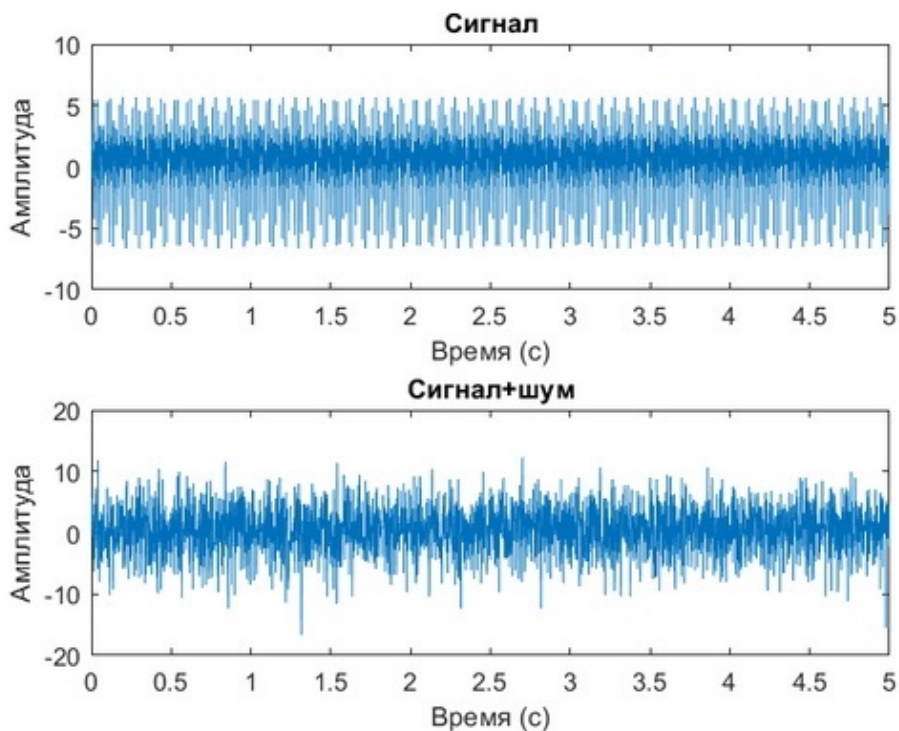


Рис. 2 - Графики чистого и зашумлённого сигналов

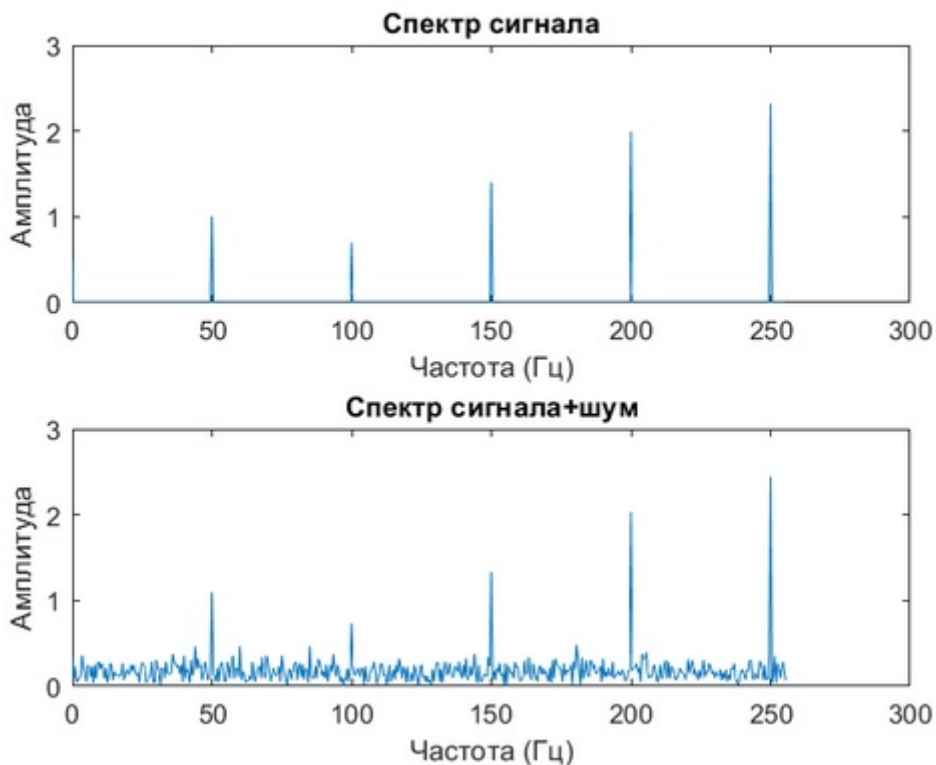


Рис. 3 - Итоговые спектры сигнала

Как можно видеть по графикам спектров, в результате БПФ чётко видны гармоники заданных синусоид и их параметры на графике соответствуют заданным изначально. Спектр зашумлённого сигнала так же демонстрирует, что гармонические сигналы были

обнаружены, не смотря на зашумление.

## VI. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

### A. Краткое описание принципа работы метода

Принцип работы метода по определению дисперсного состава пыли основан на анализе акустических сигналов, регистрируемых датчиками, установленными в системах вентиляции (пылепровода) [15]. Полученный от пылевого потока сигнал проходит через аналого-цифровой преобразователь и уже в оцифрованном виде поступает на вход в программную систему. Поскольку сигнал должен удовлетворять теореме отсчетов Котельникова [16], то оптимальной временной выборкой, являющейся при этом информативной, было принято считать сигналы длиной в две-три минуты. Так как сам процесс пылепереноса дискретен, то указанная длина исследуемого сигнала оптимальна и не допускает потери существенной информации.

Дальнейшая обработка сигнала осуществляется при помощи БПФ. Ключевыми элементами спектра, несущими основную информацию об исследуемом пылевом потоке принимаются спектральные составляющие преобразования Фурье, а именно амплитуды и частоты гармоник спектра. Каждый отдельный подспектр, представленный основной и кратными ей гармониками несёт в себе информацию об отдельной фракции пыли. Таким образом, ключевой задачей исследований является выделение этих самых подспектров из основного спектра и определение их значимых параметров.

Формирование банка данных гармоник будет проводиться в лабораторных условиях на специально разработанном стенде, который будет моделировать вентиляцию на производствах.

Таким образом, реализация метода разделяется на две подзадачи – прямую (серия обучающих экспериментов) и обратную (непосредственное определение дисперсного состава пыли). Первый этап выполняется в лабораторных условиях, объектом исследования являются заранее подготовленные навески монофракций пыли. Второй же выполняется на производствах с реальными образцами и соответственно данными.

### B. Общее видение системы

Система представляет собой приложение, позволяющее на основе входных данных – записанный цифровой сигнал шумов, издаваемых потоком пыли при соприкосновении с датчиком и стенками вентиляции, путём использования вышеописанного метода определить фракционный состав пыли, и концентрации тех или иных фракций.

Система подразумевает решение двух различных, но связанных между собой задач – ряда экспериментальных замеров подготовленных образцов монофракций и непосредственно практическое применение на произвольной производственной пыли, используя для этого данные, полученные на первом этапе.

В результате работы программы пользователю демонстрируется отображение состава и исходных звуковых спектров как в виде графиком, так и текстовым отчётом [17].

### C. Функциональные требования к экспертной системе

В системе должны быть реализованы следующие основные функции:

1. Пользователь может загружать звуковой файл (формата wav) в систему для анализа
2. Пользователь может запускать считывание информации с датчика в реальном времени
3. Должна быть возможность устанавливать настройки обработки сигнала. Например:
  - a. Тип обрабатываемого образца (угольная пыль, мучная пыль и т.д.)
  - b. Количество вычисляемых гармоник в образце
  - c. Диапазон поиска модальной гармоники (Гц)
4. Система должна обработать полученный из файла\онлайн сигнал и сформировать из него спектр Фурье.
5. На основе полученного спектра система выделяет основные и тембровые гармоники согласно заданным параметрам
6. Используя базу данных эталонных гармоник система определяет дисперсный состав пыли, чей сигнал был получен в качестве входного.
7. Возможность получить структурированную информацию об исследовании в виде отчёта.
8. Возможность сохранить полученный отчёт в отдельный файл формата pdf.
9. Возможность распечатать сформированный отчёт.

### D. Проектирование архитектуры приложения

Разрабатываемая система является клиент-серверной с толстым клиентом – основная бизнес-логика выполняется именно на нём, а сервер представляет собой хранилище данных, при помощи которых производится классификация спектров и определение дисперсного состава пыли. Так же присутствует локальная база данных, в которой хранятся данные о актуальных замерах, а так же локальная информация о предприятии и пользователей. Это связано в первую очередь с предназначением программы – она разрабатывается для применения на различных промышленных предприятиях, т.е. взаимодействия между конечными пользователями не подразумевается, так же не подразумевается какая-либо мобильность рабочих станций.

Так же, учитывая относительно небольшой объём функционала приложения, было решено использовать монолитную концепцию приложения – нет смысла плодить сущностей, это лишь дополнительно усложнит текущую систему.

Таким образом, разрабатываемое приложение подразумевает наличие следующих частей:

- Пользовательский интерфейс
- Подсистема, выполняющую основную логику приложения (математические преобразования и определение дисперсного состава на основе подспектров)
  - Локальная БД рабочих данных (тех, которые получены в результате измерений)
  - БД ‘эталонных данных’ – обучающая выборка, на основе которой происходит классификация рабочих

данных

Для реализации пользовательского интерфейса и, в первую очередь, подсистемы, обеспечивающей основную логику приложения, будет использован язык Python, как наиболее подходящий для выполнения сложных математических преобразований и работы в сфере машинного обучения.

Модель архитектуры программной системы для определения дисперсного состава пыли представлена на рисунке 3:

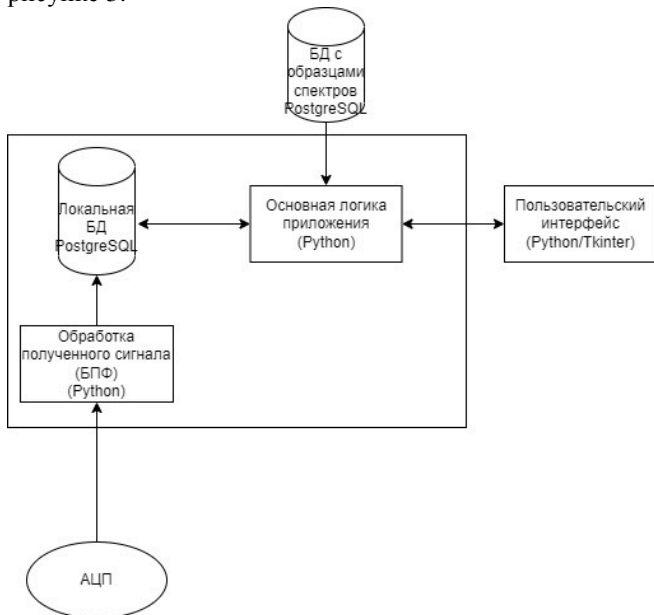


Рис. 4 - Модель архитектуры программной системы

#### Е. Прочие особенности системы

Учитывая особенности конечных пользователей и специфику приложения, не предполагается большого количества пользователей и установок программы.

Так же беря во внимание специфичность и утилитарность основного функционала программы, как и отсутствие хранимых конфиденциальных данных в самой программе, было решено отказаться от механизмов аутентификации и авторизации. Т.е. доступ к утилите будет свободным и его ограничения будут основаны на ограничениях доступа к рабочей станции в рамках политики предприятия.

Обработка исключений, перехват ошибок, и установка граничных значений является важным элементом проектируемой системы, учитывая тот факт, что большая часть действий это математические операции, которые требуют определённого уровня точности. Однако граничные условия должны учитывать тот факт, что система может быть предназначена для анализа различных типов пыли, поэтому не имеет смысла делать слишком жёсткие условия.

Впрочем, это не отменяет проработанной системы обработки ошибок связанных с графическим интерфейсом, запросами к БД и другими.

Как уже говорилось выше, приложение предполагается монолитным, поэтому особого разделение не предусмотрено. Однако стоит обратить внимание на то, что основной блок приложения, реализующий методологию (математические операции, разложение по БПФ, представление в виде спектров и вывод результатов на экран) в целом остаётся

неизменным, но получение сигнала через АЦП может отличаться в зависимости от установленной аппаратуры на предприятии. Т.е. можно сказать, что именно сама программа и будет той «компонентой», которая может быть использована в различных системах пылеучёта.

#### VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была рассмотрена актуальность создания автоматизированной информационной и экспертной системы мониторинга аэрогидрозольных потоков в промышленности и строительстве с применением компьютерного моделирования. Анализ существующих решений показал, что они не в полной мере удовлетворяют требованиям для эффективного внедрения в промышленности и строительства.

Предлагаемая к рассмотрению экспертная система будет использовать спектрально-акустический метод. Он основан на явлении излучения сигналов акустической эмиссии и позволяет производить неразрушающий контроль и анализ дисперсного потока в режиме реального времени.

Концепция экспертной системы подразумевает специализированное приложение, имеющее базу данных по определённой тематике и позволяющее конечному пользователю найти ответ на заданный вопрос. Проектируемая система будет относиться к системам смешанного типа, т.к. решает задачу мониторинга, которая является комбинацией синтеза и анализа.

Соответственно так же было рассмотрено теоретическое обоснование применяемого метода, задействованного в экспертной системе.

Взаимодействие частиц пыли в пылевом потоке между собой, стенками воздуховода и датчиком порождают сигналы акустической эмиссии, которые, в свою очередь при правильной обработке несут в себе информацию о дисперсном составе пылевого потока. Такой обработкой является представление сигнала в виде частотно-амплитудного спектра Фурье с выделением основной и кратных ей тембровых модальных гармоник. Каждая монофракция пыли имеет свой, уникальный спектр, что позволяет однозначно определять дисперсный состав пылевого потока.

Так же было выяснено, что концепция метода предполагает его выполнение в два этапа. Первый это формирование банка данных эталонных гармоник, которое производится в лабораторных условиях с использованием подготовленных навесок пыли и применением специального стенда представляющего собой обобщённую модель промышленных пылегазоходов. Второй это соответственно применение метода для анализа смеси пыли и выделения из него различных фракций на основе сформированной базы данных гармоник.

Поскольку на текущий момент проведение лабораторных экспериментов недоступно, было решено воспользоваться методами компьютерного моделирования с целью формирования тестовых образцов для дальнейшего анализа в системе.

Таким образом, была получена предметная база для разрабатываемой экспертной системы.

Был определён список функциональных и нефункциональных требований. Функциональные требования описывают основные задачи проектируемой

системы, в то время как нефункциональные затрагивают более широкий спектр особенностей системы – от локализации, до подхода к разработке и аспектов безопасности.

Была определена архитектура системы – это клиент-серверное приложение с толстым клиентом, база данных на сервере служит лишь для хранения банка данных эталонных гармоник, основная работа выполняется на рабочей станции. Была создана схема архитектуры проекта и определены слои приложения – слой представления, бизнес-логики и доступа к данным.

Таким образом, сформирована перспективная концепция информационной экспертной системы, практическое внедрение которой позволит существенно сократить расходы ресурсов и времени на мониторинг аэрогидрозольных потоков акустическим методом в промышленности и строительстве.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Федеральный закон от 27.07.2006 N 149-ФЗ (ред. от 31.07.2023) "Об информации, информационных технологиях и о защите информации"
- [2] Промышленная пыль [Электронный ресурс] – 2019 – URL: [http://www.f-med.ru/toksikologia/prom\\_pil.php](http://www.f-med.ru/toksikologia/prom_pil.php) (дата обращения - 28.08.2023)
- [3] Производственная пыль [Электронный ресурс] – 2021 – URL: <http://prom-nadzor.ru/content/proizvodstvennaya-pyl> (дата обращения - 28.08.2023)
- [4] ГОСТ 12.1.005-88 Группа Т58. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air МКС 13.040.30 ОКСТУ 0012 Дата введения 1989-01-01.
- [5] Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 57412-2017 "Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения" (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 марта 2017 г. N 110-ст). Дата введения - 1 июля 2017 г. Введен впервые.
- [6] В.А. Лепихова Е.В. Пикина 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.
- [7] Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский Базы знаний интеллектуальных систем / СПб.: Питер, 2001. —384 с.
- [8] Д.И. Муромцев, М.А. Колчин. Разработка экспертных систем в Drools Guvnog – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 54 с.
- [9] Тупицына А.И. Методы компьютерного моделирования физических процессов и сложных систем. Учебное пособие–СПб: Университет ИТМО, 2014. – 48 с
- [10] Акустическая эмиссия [Электронный ресурс] – 2022 – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Акустическая\\_эмиссия](https://ru.wikipedia.org/wiki/Акустическая_эмиссия) (дата обращения - 09.09.2023)
- [11] Лейбензон Л.С. Курс теории упругости. — М: Огиз-гостехиздат, 1947.— 464с.
- [12] Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / Пер. с англ. — М: Мир, 1984. — Т.2. — 751 с.
- [13] Бендат Дж., Пирсол А. Измерения и анализ случайных процессов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 463 с.
- [14] Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа / Пер. с нем. — М.: Наука, 1965. — 287 с.
- [15] Пат. 2097738 РФ, G01N15/02 Способ обработки сигналов датчика ударных импульсов твердых частиц аэрозольного потока / В.П. Журавлев, Г.С. Учитель, О.А. Торопов, А.И. Пуресев, Е.А. Малых, В.А. Лепихова. 96107729/25 (22) - Заявл. 18.04.96; Опубл. 27.11.97, Бюл. № 33.
- [16] Малых Е.А., Лепихова В.А., Учитель Г.С. Спиральный акустический метод контроля концентрации и дисперсности пылевых потоков в зерноперерабатывающей промышленности.: Сборник статей и кратких сообщений на материалах науч.-техн. конф. студентов аспирантов НГТУ (Новочеркасск, 1996). – Новочеркасск: НГТУ, 1996. – С76-78.
- [17] 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(36). - С. 51-55



# Computer models, automated information and expert systems for monitoring aerohydrosol flows by acoustic method in industry and construction

A.I. Riabous, K.Z. Biliatdinov, V.A. Lepikhova

**Annotation** — Innovative approaches to improving the information support for monitoring dispersed systems using acoustic methods are presented. The practical significance is based on the fact that today the use of the spectral acoustic method makes it possible to determine the dispersed composition of aerohydrosol flows with a sufficiently high accuracy. To ensure the effective application of this method, it is proposed to develop an information expert monitoring system. The expert system is complex software consisting of a data bank and auxiliary programs that perform the solution of aimed tasks and interaction with the user. The applied spectral-acoustic method is based on the principles of acoustic emission, in which sensors register sound vibrations produced by particles of the test substance in an air or liquid stream. Decomposition of the resulting audio file into a spectrum allows you to determine the composition of the studied mixture. In order to obtain the most accurate results, it was decided to use computer modeling methods to generate test files and verify the operability of the method. For this purpose, the functional requirements for the expert system are justified. The architecture of the expert system is defined. For the purposes of practical application, the general task of developing an expert system based on the study and systematization of monitoring information processes, as well as for the formation of a computer model with the definition of key parts of the expert system, is formulated.

**Key words** — acoustic emission, computer modeling, fast Fourier transform, information and expert systems, monitoring, spectral acoustic method.

## REFERENCES

- [1] Federal Law No. 149-FZ of 27.07.2006 (as amended on 31.07.2023) "On Information, Information Technologies and Information Protection"
- [2] Industrial dust [Electronic resource] – 2019 – URL: [http://www.f-med.ru/toksikologia/prom\\_pil.php](http://www.f-med.ru/toksikologia/prom_pil.php) (accessed 28.08.2023)
- [3] Industrial dust [Electronic resource] – 2021 – URL: <http://prom-nadzor.ru/content/proizvodstvennaya-pyl> (accessed 28.08.2023)
- [4] GOST 12.1.005-88 Group T58. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air MKC 13.040.30 OKSTU 0012 Date of establishment 1989-01-01.
- [5] The national standard of the Russian Federation GOST R 57412-2017 "Computer models in the processes of development, production and operation of products. General provisions" (approved by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated March 10, 2017 N 110-st). The date of establishment is July 1, 2017. Established for the first time.
- [6] V.A. Lepikhova E.V. Pekina Spectral-timbre methodology of dispersed analysis of coal dust in ventilation systems. - Actual problems of geology, mining and oil and gas business : collection of scientific tr. / South-Russian State Polytechnic University. M.I. Platov Univ. - Novocherkassk: YURSTU (NPI), 2017. - pp. 108-113.
- [7] T. A. Gavrilova, V. F. Khoroshevsky Knowledge bases of intelligent systems / St. Petersburg: Piter, 2001. -384 p.
- [8] D.I. Muromtsev, M.A. Kolchin. Development of expert systems in Drools Guvnor – St. Petersburg: ITMO Research Institute, 2013. – 54 p.
- [9] Tupitsyna A.I. Methods of computer modeling of physical processes and complex systems. Textbook– St. Petersburg: ITMO University, 2014. – 48 p
- [10] Acoustic emission [Electronic resource] – 2022 – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Акустическая\\_эмиссия](https://ru.wikipedia.org/wiki/Акустическая_эмиссия) (accessed 09.09.2023)
- [11] Leibenzon L.S. Course of elasticity theory. — Moscow: Ogiz-gostekhizdat, 1947.— 464 p.
- [12] Feller V. Introduction to probability theory and its applications / Trans. from English — M: Mir, 1984. — Vol. 2. — 751 p.
- [13] Bendat J., Pearsol A. Measurements and analysis of random processes / Trans. from English – M.: Mir, 1974. – 463 p..
- [14] Dech G. A guide to the practical application of the Laplace transform / Trans. from German — M.: Nauka, 1965. — 287 p.
- [15] Pat. 2097738 RF, G01N15/02 Method of signal processing of the sensor of shock pulses of solid particles of aerosol flow / V.P. Zhuravlev, G.S. Uchitel, O.A. Toropov, A.I. Puresev, E.A. Malykh, V.A. Lepikhova. 96107729/25 (22) - Application No. 18.04.96; Publ. 27.11.97, Bul. No. 33.
- [16] Malykh E.A., Lepikhova V.A., Uchitel G.S. Spiral acoustic method for monitoring the concentration and dispersion of dust flows in the grain processing industry: Collection of articles and brief reports on the materials of scientific and technical. conf. of graduate students of NSTU (Novocherkassk, 1996). – Novocherkassk: NSTU, 1996. – pp. 76-78.
- [17] Osipov N.A., Riabous A.I., Lepikhova V.A., Yevtushenko S.I. Diagnostics of dust flow dispersion by acoustic emission signals during construction works // Construction and Architecture -2022. - T. 10. - № 3(36). - Pp. 51-55