

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА  
МАТЕРИАЛА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММ ПУАНКАРЕ**

*Аннотация. Работа посвящена задаче разработке методов определения гранулометрического состава материала на основе акустического мониторинга. Основная проблема исследуемой задачи заключается в сложности реализации и низкой точности традиционных методов. Основной целью работы является разработка метода анализа гранулометрического состава смеси по акустическим сигналам, измеренным в зоне измельчения мельницы. Предлагается метод анализа структуры сигналов, основанный на применении диаграммы Пуанкаре и методов анализа изображений. Предложенный метод позволяет выявить состав смеси по сигналам отдельных фракций.*

*Ключевые слова: гранулометрический состав, диаграмма Пуанкаре, анализ изображений.*

**Введение.** Тонкоизмельченные материалы широко используются во многих отраслях промышленности и новых технологиях. При этом большое внимание уделяется качеству, однородности и чистоте продуктов.

Критерием, с помощью которого можно определить качество промежуточной и готовой продукции в порошковой технологии, является гранулометрический состав и связанные с ним показатели (удельная поверхность, пористость, прочность и т.д.). Анализ гранулометрического состава порошков является распространенным методом исследований веществ, материалов и изделий во многих технологических процессах. Существующие способы определения гранулометрического состава порошкообразных материалов сложны и трудоемки или не позволяют достаточно точно определить гранулометрический состав материала. Поэтому разработка математических методов, позволяющих определять фракционный состав материала на основе

первичной информации, измеренной в процессе акустического мониторинга, является **актуальной задачей**.

**Целью данной работы** является разработка математического метода анализа гранулометрического состава материала на основе акустических сигналов, записанных при транспортировке материала в потоке энергоносителя (воздуха) и в зоне измельчения струйной мельницы.

Для исследования связей акустических сигналов с гранулометрическим составом сыпучего материала была разработана установка для транспортирования частиц энергоносителем (сжатым воздухом) и одновременного акустического анализа. Она работает следующим образом. Энергоноситель под давлением  $P = 0,3$  МПа подается в разгонную трубку. Сыпучий материал (узкие фракции или смесь) крупностью менее 2,5 мм подается из бункера, подхватывается энергоносителем и транспортируется над волноводом. Частицы соударяются с волноводом, который связан с пьезокерамическим датчиком. Акустические сигналы передаются с датчика через АЦП в компьютер для анализа и обработки.

Записанные сигналы при транспортировке кварцевого песка послужили основой верификации математического метода анализа, описанного ниже.

**Исходные данные.** Исходными данными проведенного анализа были акустические сигналы, полученные при транспортировке кварцевого песка с частотой дискретизации 400 кГц. Длина выборок 40000 отсчетов, что соответствует 0,1 секунде. Для кварцевого песка был взят один сигнал смеси, содержащей в себе две фракции – 0,01 и 0,03 мм. В качестве исходных данных также были использованы сигналы, записанные при транспортировке отдельных фракций: 0.04, 0.03, 0.02, 0.01, и 0.005 мм.

Все сигналы содержат шесть характерных частот, которые приведены на рисунке 1.

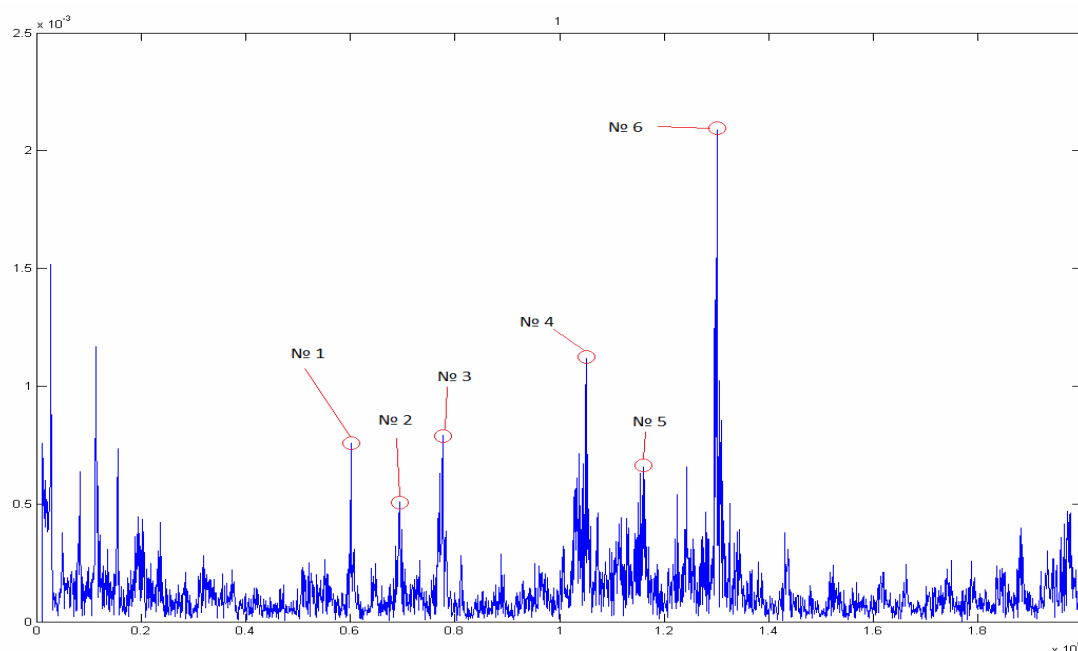


Рисунок 1 – Спектральный состав, характерный для всех исследуемых акустических сигналов

Амплитуда всех сигналов этих частот различается. Исследования показали, что наиболее показательной оказалась характерная частота №6 (около 120 кГц в спектре), поэтому при дальнейшем анализе использовались сигналы с отфильтрованной частотой №6. Фильтрация проводилась полосовым фильтром Баттерворта второго порядка, который был выбран для минимизации вращения фазы.

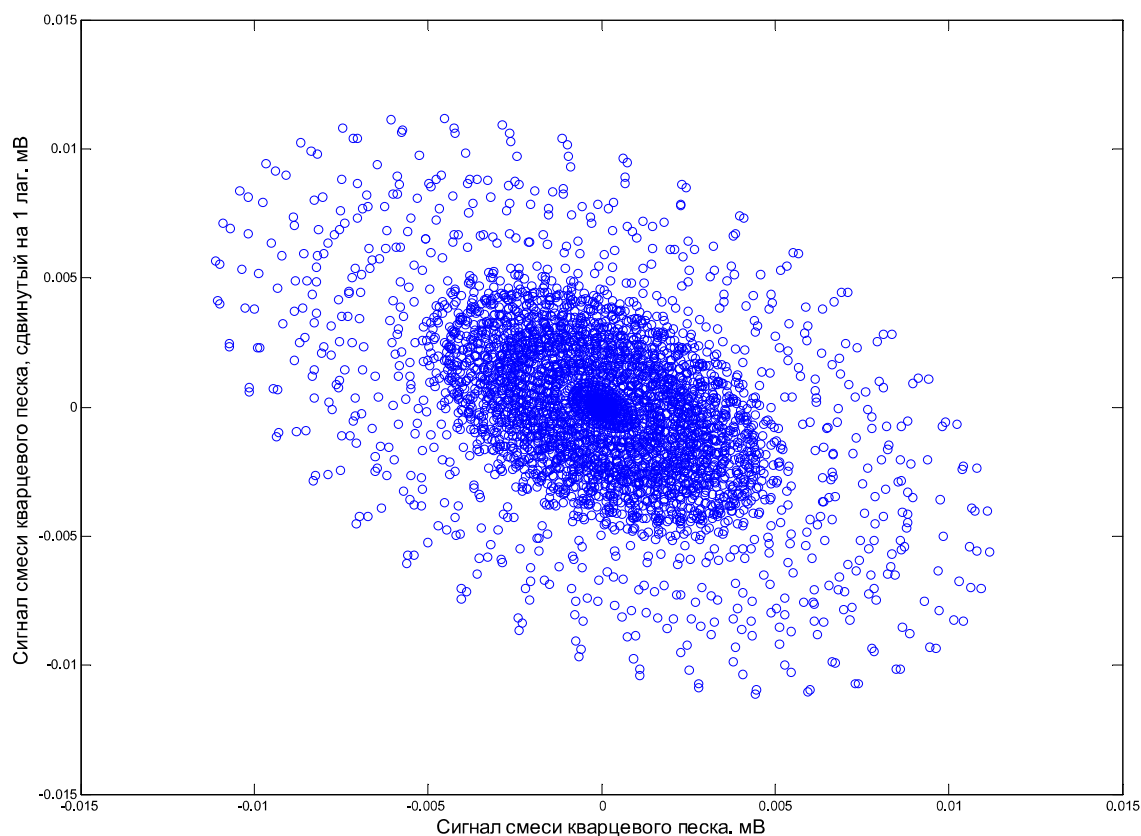
**Метод анализа.** Как уже было сказано, задача состоит в нахождении состава смеси нескольких фракций с использованием исходных акустических сигналов отдельных фракций. Основой анализа является гипотеза о том, что акустический сигнал смеси фракций может быть представлен суммой отдельных фракций. Следовательно, сигнал смеси должен сильно коррелировать с сигналом комбинации отдельных фракций. Гипотеза проверялась путем сравнения кросс-корреляций функций плотности распределения (ФПР) диаграмм Пуанкаре [1] сигналов смеси с сигналами суммы отдельных фракций.

Диаграмма Пуанкаре строилась путем размещения по осям абсцисс и ординат сигнала без сдвига и сигнала с одним лагом, соответственно. Для определения функции распределения находится центр масс диаграммы:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

$$Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i},$$
(1)

где  $x, y$  – координаты точек диаграммы Пуанкаре,  $n$  – количество точек диаграммы,  $m$  – масса точек,  $X_c, Y_c$  – координаты центра масс. Затем от центра масс проводятся окружности с разным радиусом, и вычисляется количество точек попавших в окружности. Потом данное количество нормируется по длине радиуса [2]. В результате таких вычислений строятся ФПР для смеси и для сумм фракций (см. рис. 2).



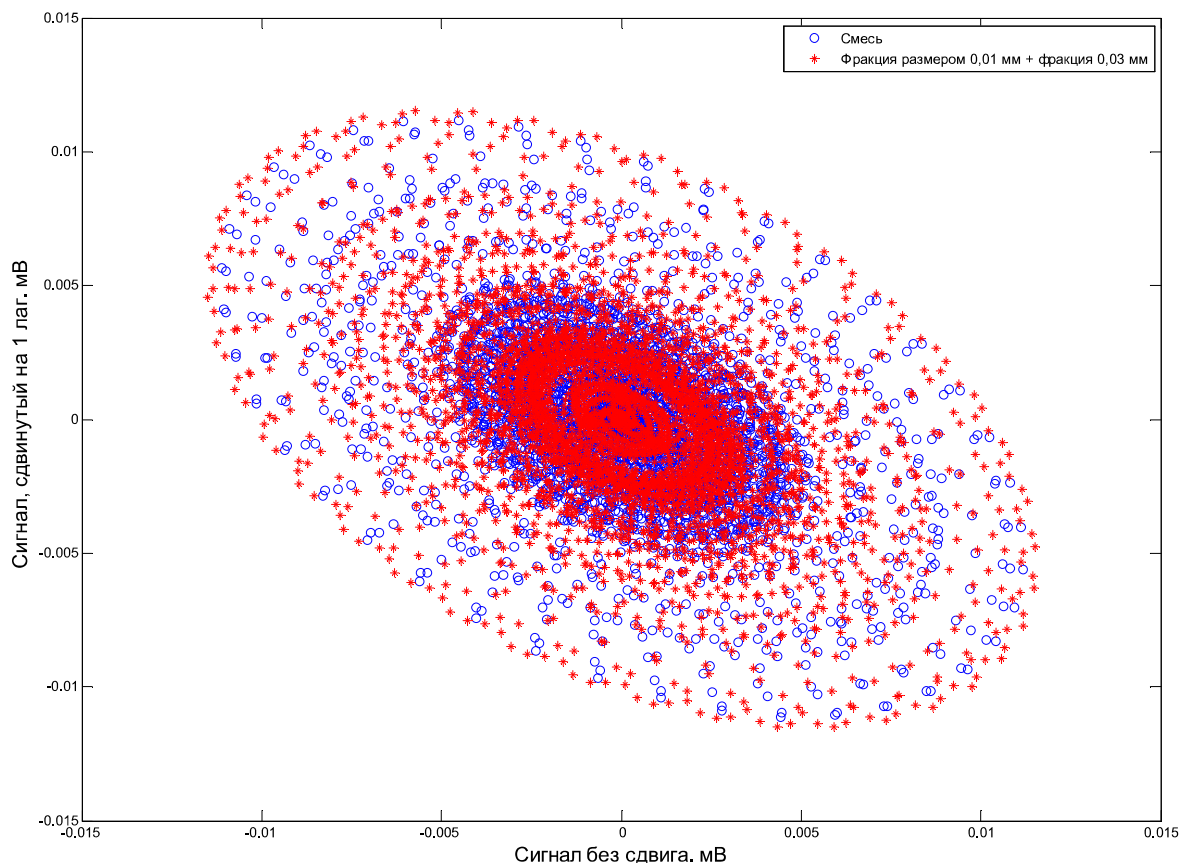


Рисунок 2 – Диаграммы Пуанкаре смеси кварцевого песка без наложений и с наложенным сигналом суммы отдельных фракций

Ниже приведены ФПР и две суммы фракций. Параметры круга, которые были использованы при расчетах:

- начальный радиус: 0.001;
- длина промежутка увеличения радиуса:  $5e-4$ ;
- количество шагов: 30.

Последним этапом метода определения структуры смеси является расчет кросс-корреляции ФПР сумм отдельных фракций с функцией смеси. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Кросс-корреляция ФПР сумм отдельных фракций и смеси

Сумма фракций		Кросс-корреляция ФПР сумм фракций с функцией смеси
Размер фракции №1, мм	Размер фракции №2, мм	
0,01	0,03	0,98
0,005	0,02	0,83
0,005	0,04	0,73
0,02	0,04	0,84

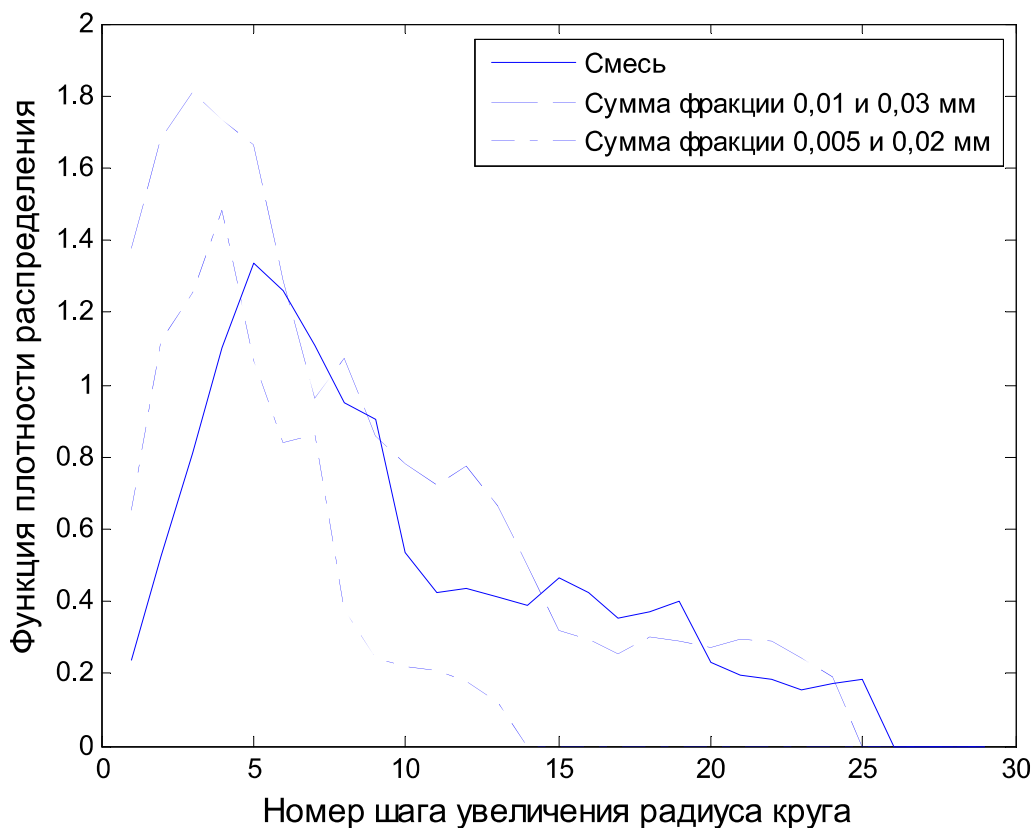


Рисунок 3 – ФПР смеси и суммы сигналов отдельных фракций

Состав смеси содержал фракции размером 0,01 и 0,03 мм, в таблице 1 сумма данных фракций имеет наибольший коэффициент корреляции с сигналом смеси. Таким образом, метод позволяет выявить состав смеси по отдельным фракциям. Метод находится на ранней стадии разработки, поэтому точность анализа основана на критерии воспроизводимости эксперимента. Также из таблицы видно, что для различных сумм фракций коэффициенты корреляции практически совпадают. Возможно, это связано с тем, что для анализа диаграмм Пуанкаре использовался простейший метод построения ФПР с помощью окружности, или с тем, что количество материала каждой фракции в смеси было разным. В дальнейшем планируется использовать более эффективные методы сегментации изображений для проведения данного анализа, что возможно повысит точность определения состава смеси, а также провести измерения смеси с одинаковым количеством материала каждой фракции.

**Выводы.** Предложен метод предварительного анализа гранулометрического состава сыпучего материала, транспортируемого в потоке, по результатам акустического мониторинга транспортировки отдельных фракций исследуемого материала. Метод основан на анализе диаграмм Пуанкаре и сравнении кросс-корреляций функций плотности распределения сумм отдельных фракций с функцией смеси. Максимальное значение коэффициента корреляции позволило определить наличие искомой суммы фракций. Необходимо повысить точность анализа гранулометрического состава смеси сыпучего материала в потоке на основе более эффективных методов сегментации изображений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арнольд В.И. Геометрические методы в теории обыкновенных дифференциальных уравнений. – Ижевск: Ижевская республиканская типография. 2000. – 400 С.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – Издание 3-е, исправленное и дополненное. – Москва: Техносфера, 2012. – 1104 С.