Инженерный вестник Дона, №8 (2025)
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10323

Технология переработки фосфогипса с использованием акустических методов

В.А. Лепихова, Н.В. Ляшенко

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск

Аннотация: В статье рассмотрена перспективная технология неразрушающего контроля дисперсного состава фосфогипса на основе акустических методов анализа. Проведен анализ возможностей спектрально-тембрового подхода для оценки фракционной структуры пересыпающегося материала. Установлена взаимосвязь между акустическим откликом потока частиц и его дисперсностью. Обоснована целесообразность интеграции метода в технологические процессы переработки техногенного сырья. Выявлена высокая эффективность предложенного подхода в условиях автоматизированных линий в строительной отрасли.
Ключевые слова: фосфогипс, акустические методы, спектральный анализ, дисперсность, Fourier-анализ, строительные материалы.

Фосфогипс – побочный продукт производства фосфорных удобрений – – представляет собой обширный и слабоиспользуемый техногенный ресурс. По оценкам, только на территории Российской Федерации накоплено свыше 500 миллионов тонн этого материала, что порождает как экологические, так и логистические вызовы [1,2].

В настоящее время применение фосфогипса, а также другие продукты его переработки осуществляются с применением различных способов и направлений (рис. 1).

В связи с увеличением площади засоленных почв, появление которых связано с изменением климатических условий, фосфогипс используют для рекультивации почв и в качестве компонента для компостирования органических удобрений в сельском хозяйстве [3]. С учетом содержания сульфата кальция ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), фосфогипс обладает потенциальной ценностью для различных отраслей промышленности, в первую очередь – строительной [4-6].

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Рис. 1. Основные направления использования фосфогипса

Современные технологические подходы требуют высокого уровня контроля характеристик вторичных ресурсов [7]. Фракционный состав фосфогипса напрямую влияет на его реакционную способность, плотность, прочность образуемых композиций и возможность его участия в синергетических реакциях с другими вяжущими. Следовательно, необходим надежный и оперативный метод анализа дисперсности материала. Одним из таких методов является спектрально-акустический анализ, позволяющий регистрировать и интерпретировать акустический отклик пересыпающихся частиц.

Использование фосфогипса в строительных материалах охватывает несколько направлений [8]. Во-первых, он может применяться в качестве минеральной добавки к портландцементу и гипсовым вяжущим. Во-вторых, он служит заполнителем в растворах и бетонах, особенно в легких ячеистых системах. При введении в известковые композиции фосфогипс способствует ускорению твердения, а при совместном использовании с алюминатами цемента инициирует газовыделение и формирование пористости, что актуально для строительных блоков [9].

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Однако нестабильность фракционного состава приводит к флуктуациям в рецептурах, ухудшению однородности конечной продукции и нарушению режимов твердения. Поэтому точное определение дисперсности фосфогипса становится важным условием технологической устойчивости [10,11].

Акустический метод основан на регистрации звуковых сигналов, возникающих при движении, ударе и пересыпании частиц материала внутри технологических трубопроводов, бункеров и дозаторов. Колебания, вызванные столкновениями частиц с твердыми поверхностями, воспринимаются вибродатчиками и преобразуются в цифровой сигнал, анализ которого позволяет делать выводы о характере потока [12,13].

Характеристики сигнала зависят от:

- массы и плотности частиц;
- скорости и угла столкновения;
- материала поверхности;
- агрегатного состояния фосфогипса.

Общий вид сигнала можно выразить как:

$$s(t) = \sum_{i=1}^{N} A_i \cdot \sin(2\pi f_i \cdot t + \phi_i),$$

где A_i – амплитуда колебаний от частицы i;

f_i – частота удара;

ϕ_i – фазовый сдвиг.

Частицы разного размера и плотности обладают отличающимися акустическими свойствами. Мелкие фракции создают высокочастотные шумы с характерными «сыпающимися» спектрами, тогда как крупные частицы генерируют низкочастотные удары с четкими доминантами. Эти свойства позволяют использовать акустические методы в качестве непрерывного экспресс-контроля дисперсности фосфогипса.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

После первичной регистрации акустического сигнала осуществляется его обработка методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). В результате получаем спектр частот, в котором можно выделить отдельные подспектры. Каждый подспектр содержит основную частоту и кратные ей гармоники, называемые тембровыми. Их характеристики – амплитуда, ширина полосы, энергетическая насыщенность – непосредственно связаны с дисперсным составом потока.

Чем мельче частицы, тем выше энергетическая плотность высокочастотных гармоник. В то же время преобладание низких частот говорит о присутствии крупных элементов. Таким образом, спектральная карта сигнала служит своего рода «акустическим паспортом» пересыпающегося материала.

Реализация акустических методов на производственных линиях уже доказала свою эффективность. Например, на участках подготовки углеграфитовой шихты успешно применялись виброакустические датчики, интегрированные в автоматизированные системы управления. Аналогичная схема применима для линий, перерабатывающих фосфогипс [14].

Датчики размещаются на участках пересыпания – между бункерами, питателями, сушильными установками или смесителями. Акустический сигнал регистрируется в режиме реального времени, обрабатывается встроенным спектроанализатором, а его результат автоматически передается в контроллер управления технологическим процессом.

Преимуществами метода являются: отсутствие необходимости вмешательства в поток; высокая чувствительность к изменению дисперсности; возможность полной автоматизации и интеграции в существующие SCADA-системы; компактность оборудования и невысокая стоимость.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

С технической точки зрения система состоит из вибродатчика, усилителя сигнала, аналого-цифрового преобразователя, блока спектрального анализа и интерфейса управления. Обработка данных занимает доли секунды, что позволяет осуществлять непрерывный мониторинг.

Проведенный анализ показал, что акустические методы, основанные на спектрально-тембровом анализе пересыпающихся частиц, являются эффективным инструментом контроля дисперсного состава фосфогипса. Установлена четкая зависимость между характеристиками спектра акустического сигнала и размером частиц, что позволяет использовать метод как для классификации материала, так и для оптимизации технологических процессов [15].

Интеграция таких систем в реальные производственные линии обеспечивает повышение качества продукции, снижение доли брака и экономию ресурсов. Применение спектрально-акустического анализа можно рассматривать как важный шаг к созданию интеллектуальных систем управления в строительной индустрии.

Литература

1. Недбаев И.С., Цывкунова Н.В., Елсукова Е.Ю. Обзор российского и мирового опыта решения экологических проблем производства, хранения, переработки и использования фосфогипса // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. №. 4. С. 10.

2. Меденников, О.А., Егорова М.А., Шабельская Н.П. Обзор инновационных методов переработки фосфогипса // Инновационные исследования: опыт, проблемы внедрения результатов и пути решения: монография. Уфа: "Аэтерна", 2024. С. 5-39.

3. Кочетков А.В., Щеголева Н.В., Коротковский С.А., Талалай В.В., Васильев Ю.Э., Шашков И.Г. Условия получения фосфогипса как отхода –

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

побочного продукта производства азотно-фосфорных удобрений // Транспортные сооружения. 2019. №2. URL: t-s.today/PDF/01SATS219.pdf.

4. Кузибоев Ш.Ш. Краткий обзор данных по использование фосфогипса на строительстве // Экономика и социум. 2021. №. 12-2 (91). С. 147-150.

5. Винниченко В.И., Костюк Т.А., Мокренко Н.Н., Иващенко Т.Г. Строительные материалы на основе фосфогипса // Сухие строительные смеси. 2014. №3. С. 18-19.

6. Кравченко П. А., Куликова О. А., Волгарева Е. А., Костылев А. А., Лещенко М. И. Перспективы исследований фосфогипса как материала для строительства // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2024. Т. 21. С. 7–21.

7. Кочетков А.В., Коротковский С.А., Талалай В.В. Устройство слоев транспортных сооружений из фосфогипса полугидрата (побочного продукта производства азотно-фосфорных удобрений) // Новые технологии в строительстве. 2022. №1. С. 1-7.

8. Довыденко А.В., Лунёв А.А. Использование фосфогипса в сфере дорожного строительства: потенциал и проблемы // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. №. 2. С. 254-269.

9. Шабельская Н.П., Меденников О.А., Хлиян З.Д., Ульянова В.А., Гайдукова Ю.А., Таранушич В.А., Кузнецов Д.М. Технологические особенности восстановительной термообработки фосфогипса // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 2(128). С. 15.

10. Манжина С.А., Денисов В.В., Денисова И.А. Использование крупнотоннажного отхода фосфогипса для снижения SO_2-содержащих выбросов угольной теплоэлектростанции // Инженерный вестник Дона, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2358.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

11. Qin W. Signal Analysis of Characteristics Using Passive Acoustic Emission Technique in Gas-Solid Pipeline Flows // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2022. pp. 1-7.

12. Zhang G., Yan Y., Hu Y., Zheng G. Investigations into the sensing mechanism of acoustic emission sensors for particle size measurement in a particular case: Normal // Measurement Science and Technology. 2021. V. 32. No. 7. pp. 075107-075107.

13. Состина Е. В. Математическая модель автоматизированной системы составления сложных дисперсных композиций // Инженерный вестник Дона, 2020, № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2020/6460

14. Лепихова В.А., Ляшенко Н.В., Рябоус А.Ю. Автоматизация корректировки рецепта коксопековой композиции в производстве электродной продукции // XXI Международная научно-практическая конференция "Экология и безопасность жизнедеятельности". Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. С. 117-120.

15. Лепихова В.А., Ляшенко Н.В. Оптимизация автоматизированной системы управления технологическим процессом дозирования углеграфитовых материалов для производства электродной продукции // Инженерный вестник Дона, 2025, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10069

References.

1. Nedbaev I.S., Tsyvkunova N.V., Elsukova E.Yu. The Eurasian Scientific Journal. 2022. V. 14. №. 4. No. 10.

2. Medennikov O.A., Egorova M.A., Shabelskaya N.P. Innovacionnye issledovanija: opyt, problemy vnedrenija rezul'tatov i puti reshenija: monografija (Innovative research: experience, problems of implementation of results and solutions: monograph). Ufa: «Aeterna", 2024. pp. 5-39.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

3. Kochetkov A.V., Shchegoleva N.V., Korotkovskiy S.A., Talalay V.V., Vasil'yev Yu.E., Shashkov I.G. Transportnyye sooruzheniya. 2019. №2. URL: t-s.today/PDF/01SATS219.pdf.

4. Kuziboev Sh. Sh. Economy and society. 2021. №. 12-2 (91). pp. 147-150.

5. Vinnichenko V.I., Kostyuk T.A., Mokrenko N.N., Ivashenko T.G. Dry building mixes. 2014. №3. pp. 18-19.

6. Kravchenko P. A., Kulikova O. A., Volgareva Ye. A., Kostylev A. A., Leshchenko M. I. Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2024. T. 21. 1. pp. 7-21.

7. Kochetkov A.V., Korotkovskiy S.A., Talalai V.V. New Technologies in Construction. 2022. №1. pp. 1-7.

8. Dovydenko A.V., Lunev A.A. Vestnik MGSU. 2023. V. 18. №. 2. pp. 254-269.

9. Shabelskaya N.P., Medennikov O.A., Khliyan Z.D., Ulyanova V.A., Gaidukova Y.A., Taranushich H.A., Kuznetsov D.M. International Research Journal. 2023. № 2(128). p. 15.

10. Manzhina S.A., Denisov V.V., Denisova I.A. Inzhenernyi vestnik Dona, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2358.

11. Qin W. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2022. pp. 1-7.

12. Zhang G., Yan Y., Hu Y., Zheng G. Measurement Science and Technology. 2021. V. 32. No. 7. pp. 075107-075107.

13. Sostina E.V. Inzhenernyi vestnik Dona, 2020, № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2020/6460

14. Lepikhova V.A., Lyashenko N.V., Ryabous A.Yu. XXI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatelnosti". Penza, 2021. pp. 117-120.

15. Lepikhova V.A. Lyashenko N.V. Inzhenernyi vestnik Dona, 2025, № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10069.

Дата поступления: 10.06.2025

Дата публикации: 1.08.2025

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025