УДК 622.23.05

Желтов Алексей Борисович, студент группы ПСб-251, 2 курс
Пузынин Андрей Владимирович, к.ф-м.н., доцент кафедры физики
(КузГТУ, г. Кемерово)
Zheltov Aleksey Borisovich, second-year student, group PSb-251,
Puzynin Andrey Vladimirovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Physics
(KuzSTU, Kemerovo)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РОБОТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГОРНОГО МАССИВА МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНО-ВИБРАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

PHYSICAL PRINCIPLES OF ROBOTIC EQUIPMENT FOR ROCK MASS DIAGNOSTICS USING SPECTRAL VIBRATION PROBING

Аннотация. Рассмотрены основные физические методы для автоматизированной диагностики горного массива. Предложена концепция по вычислению индекса спектральной аномальности исходя из отклонений физических параметров горного массива от эталонных значений, обозначены ограничения описанной модели.

Annotation. The main physical methods for automated rock mass diagnostics are examined. A concept for calculating a spectral anomaly index based on deviations of the physical parameters of the rock mass from reference values is proposed. The limitations of the model are outlined.

Важным применением горных машин и оборудования является мониторинг текущего состояния горных выработок. Сфера горнодобывающей промышленности является не только важным сегментом промышленности, но и актуальным вопросом производственной безопасности.

Научная новизна этой работы заключается в том, что предлагается индекс спектральной аномальности, построенной на исследовании амплитуды колебаний, резонансной частоты и добротности горных пород. Особенно это важно в вопросах прогнозирования возможных аварийных условий в районе горных выработок. Все эти показатели находятся с использованием горного оборудования и в дальнейшем вычисляются их отклонения от эталонных значений, что и формирует предложенный индекс спектральной аномальности.

Аварийные участки могут включать в себя следующие опасные факторы:

- CO;
- метан;

- недостаток O_2;
- высокая температура;
- дым и пыль;
- повреждения выработки;
- вероятность повторного обрушения [1].

Важным инструментом данного исследования является физическая сущность горного оборудования, а также прикладного применения в области разработки автоматизированного комплекса, позволяющего своевременно анализировать текущее состояние и оповещать о возможных отклонениях от состояния нормы. Первичное обследование потенциально опасной территории проводят специализированными горными машинами.

На сегодняшний день активно применяются различные спасательные роботы или инспекционные комплексы горнодобывающей промышленности:

- камеры;
- LiDAR;
- тепловизоры;
- датчики газов;
- температуры;
- влажности;
- воздушного потока;
- инерциальные датчики [2].

Рассмотрим поставленный вопрос с точки зрения физики. Технология LiDAR грамотно строит геометрические модели объектов, тепловизор – анализирует температурные условия, а газоанализатор – фиксирует состав атмосферы. Однако задача оценки скрытого изменения физического состояния горных выработок требует более глубокого анализа: внешне однородный участок породы может иметь внутренние дефекты (трещины, ослабления и прочие неоднородности), недоступные человеческому глазу [3].

Для начала следует рассмотреть физические законы, позволяющие подобраться к сути современного горного оборудования. Выводы, которые в ходе исследования будут получены, войдут в основу формирования концепции роботизированной машины, зондирующей горный массив, благодаря чему будет предложена потенциально перспективная идея в сфере разработки горного оборудования, применяемого в мониторинге состояния массивов.

Технология LiDAR является основным элементом дистанционного измерения расстояний между объектами. В основе механизма лежит принцип лазерного обнаружения: излучая короткий световой импульс, лазер получает часть отражённого света от поверхности горной породы, после чего электроника оборудования регистрирует полученные результаты. Главным показателем является время между отправкой и получением импульса – чем

дальше объект, тем дольше лазер будет его достигать и отражаться к приёмнику. LiDAR полезен для точного определения препятствий или изменения формы тоннелей, а также фиксации изменений в деформации горных поверхностей

Формула измерения расстояния (d) до объекта (1):

$$d = \frac{c * \Delta t}{2}, \text{м} \quad (1)$$

где с – скорость света в воздухе (около $3 * 10^8 \text{м/с}$), Δt – время прохождения импульса до объекта и обратно к приёмнику.

Тепловизор позволяет дистанционно измерять тепловое излучение за счёт реагирования на инфракрасное электромагнитное излучение объектов и вычисления их температуры. Физической основой этого устройства являются электромагнитные тепловые излучения, испускаемые любым телом, температура которого выше абсолютного нуля.

Закон Стефана-Больцмана для измерения температуры поверхности в зависимости от условий среды (2):

$$P = \varepsilon * \sigma * S * T^4, \text{Вт} \quad (2)$$

где P – мощность теплового излучения поверхности, ε – степень черноты поверхности (от 0 до 1), σ – постоянная Стефана-Больцмана (около $5{,}67 * 10^{-8}\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$), S – площадь излучающей поверхности (м^2), T – абсолютная температура поверхности (К).

Измерение концентрации газов активно применяется, поскольку горное оборудование, включающее в себя технологии газоанализаторов, способны зафиксировать опасные показатели для газовых смесей, способных поразить горные породы или дыхательную систему человека. Физическая сущность данного метода тривиальна: она заключается в измерении молярной доли каждого компонента при одинаковых температуре и давлении.

Формула измерения объёмной концентрации (3):

$$C_i = \frac{V_i}{V_{\text{смеси}}} * 100\%, \quad (3)$$

где V_i – объём рассматриваемого газа (м^3), $V_{\text{смеси}}$ – общий объём газовой смеси (м^3).

Перечисленные методы и физические законы, лежащие в основе каждого из них, наглядно показывают: если посмотреть на широкий вопрос горных машин и технологий, применяемых в вопросах производственной

безопасности, под углом фундаментальной физики, то принцип их работы становится закономерным. Таким образом, необходимо проанализировать систему спектрально-вибрационного зондирования для получения информации о состоянии горного массива системно [4].

Несмотря на сложное устройство горного массива на практике, физической моделью системы массы-жёсткости (4) может объяснить формула свободных колебаний идеального пружинного осциллятора:

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{Гц} \quad (4)$$

где f_0 – собственная частота колебаний (Гц), k – жёсткость механической системы (Н / м), m – масса колеблющегося телам (кг).

Данная формула позволяет упрощённо понимать, как горный роботизированный комплекс сможет проводить вычисления жёсткости участка горной породы. При наличии трещины или ослабевании части массива система сумеет вовремя определить и измерить степень механической аномалии. Однако принципиальным ограничением является упрощённый взгляд на горный массив: он не является пружинкой с грузом, на деле колебательные режимы состоят из более сложных систем. Представленная формула – лишь физическое обоснование будущей работе.

Необходима такая физическая концепция, в которой можно индуцировать механические колебания, создающие контролируемое воздействие. Горная порода, в свою очередь, будет передавать, отражать и рассеивать упругие волны, что создаст вибрационный отклик, который можно зафиксировать механическими датчиками.

Для индуцирования механических колебаний уместным станет гармоническое воздействие (5):

$$F(t) = F_0 * \sin(2\pi * f * t), \text{Н} \quad (5)$$

где $F(t)$ – мгновенное значение воздействующей силы (Н), F_0 – амплитуда силы (Н), f – частота возбуждения (Гц), t – время (с).

Синусоида описывает периодическое воздействие, предложенная система позволяет создать силу, которая изменяется во времени. При последовательном возбуждении, создаваемым специализированным вибрационным устройством, разных частот и наблюдении реакции породы на них важно контролировать безопасность диапазона возбуждения – в аварийных условиях горная порода может не выдержать слишком высокой частоты колебаний.

Использование амплитудно-частотной характеристики позволит определить зависимость амплитуды установившихся колебаний механической системы от частоты внешнего периодического воздействия, рассмотренного ранее. Гипотетически, изменение данного параметра свидетельствует о механической неоднородности горного массива, а в частных случаях (при учёте всех величин) – о возможных повреждениях.

Формула из теории вынужденных механических колебаний (6):

$$A(f) = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m * (2\pi * f)^2)^2 + (b * 2\pi * f)^2}}, \text{м} \qquad (6)$$

где $A(f)$ – амплитуда установившихся колебаний при частоте f (м), F_0 – амплитуда внешней силы (Н), k – жёсткость системы (Н / м), m – масса колеблющейся системы (кг), f – частота внешнего воздействия (Гц), b – коэффициент вязкого сопротивления (Н*с / м).

Важно обозначить и формулу добротности (7) слабо затухающей резонансной системы при определении ширины резонанса:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}, \qquad (7)$$

где f_0 – резонансная частота (Гц), Δf – ширина резонансной полосы (Гц).

Практическая польза добротности заключается в диагностировании изменений контактов между различными участками породы, что влияет на рассеивание энергии механических колебаний. В сочетании с учётом свойств материала, контакта с крепью, влажности и геометрии всех форм, данный показатель способен также выявить аномальные признаки горных пород.

Сформируем собственный индекс спектральной аномальности (8) для рассматриваемого участка, используя сведения, полученные ранее:

$$I_S = \frac{|f - f_r|}{f_r} + \frac{|Q - Q_r|}{Q_r} + \frac{|A - A_r|}{A_r}, \qquad (8)$$

где f – измеренная частота участка (Гц), Q – измеренная добротность участка, A – измеренная амплитуда (м), f_r – эталонная частота (Гц), Q_r – эталонная добротность, A_r – эталонная амплитуда (м).

С математической точки зрения, выведенная формула позволяет зафиксировать суммарные аномальные изменения рассматриваемого участка, взятые со знаком модуля (не имеет значения, в большую или меньшую сторону проявлен характер отклонения от нормы), делённые на эталонные

величины, которые можно получить при непосредственном проектировании роботизированного комплекса и принять их за нормальное состояние среды.

Однако, в ходе проектирования, очевидным станет тот факт, что каждое слагаемое формулы имеет разную значимость для измерения аномальности системы, поэтому можно рассмотреть предложение с учётом весовых коэффициентов (w_f, w_Q, w_A) для каждого из параметров (9):

$$I_S = w_f * \frac{|f - f_r|}{f_r} + w_Q * \frac{|Q - Q_r|}{Q_r} + w_A * \frac{|A - A_r|}{A_r}, \quad (9)$$

Объединив 3 независимых характеристики колебательного отклика в единый показатель, можно предположить, что полученный индекс спектральной анормальности может лечь в основу проектирования горных машин, назначенных диагностировать потенциально опасные изменения в горных породах. Однако важно отметить, что многие показатели абстракты – весовые коэффициенты и эталонные величины обозначены условно, их точное значение можно получить лишь в промышленных условиях. Помимо этого, всё исследование является упрощённой моделью рассматриваемой проблемы, поскольку без практических опытов интеграция в предлагаемую систему условий, материала породы, плотности, давления и температур измерения будут проблематичными [5]. Более того, не всякая спектральная аномалия должна служить сигналом об опасности – природу процессов важно исследовать более системно и глубоко. Однако идея и упрощённая модель предложенной системы и выведенных формул могут стать звеном, которое позволит заглянуть на вопрос горного оборудования и производственной безопасности под новым углом и стать основанием для научных и практических экспериментов.

Список литературы

1. Александров, С. Н. Охрана труда в угольной промышленности : учебное пособие для студентов горных специальностей высших учебных заведений / С. Н. Александров, Ю. Ф. Булгаков, В. В. Яйло ; под общей редакцией Ю. Ф. Булгакова. – Донецк : РИА ДонНТУ, 2012. – 480 с.
2. Грейс, А. А. Интеллектуальная система геомеханического и экологического мониторинга карьеров на основе LiDAR и распределённой сети Smart Dust / А. А. Грейс, И. В. Ковалев, А. А. Ворошилова // Российская наука, инновации, образование : материалы V Всероссийской (национальной) научной конференции (РОСНИО-V-2026). – 2026. – DOI 10.47813/rosnio.5.2026.19.4031. – URL: https://ruconf-domnit.ru/media/uploads/ckeditor/2026/07/01/4031-v-2026.pdf (дата обращения: 19.10.2026). – Текст : электронный.

3. Трещины в горных породах : методические указания к лабораторной работе по курсу «Геология» (раздел «Структурная геология») для студентов направления подготовки 550600 / Кузбасский государственный технический университет, кафедра геологии ; составитель С. В. Гуков. – Кемерово, 2000. – URL: https://studfile.net/preview/416704/ (дата обращения: 19.10.2026). – Текст : электронный.

4. Горбачев, А. С. Параметры искусственного акустического сигнала в слоистом массиве / А. С. Горбачев, В. И. Шилов, Д. А. Шилов // Вестник НЦ ВостНИИ. – 2025. – № 2. – С. 13–26. – DOI 10.25558/VOSTNII.2025.34.10.002. – URL: http://vestnik.nc-vostnii.ru/upload/iblock/04a/tgqgwx6kcnhpbhl4d22zib6ad3v6i30r.pdf (дата обращения: 19.10.2026). – Текст : электронный.

5. Джумабаев, Т. Е. Физика горных пород : лабораторная работа № 1 «Определение плотности горных пород методом гидростатического взвешивания» / Т. Е. Джумабаев ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2015. – URL: https://studfile.net/preview/6224915/ (дата обращения: 19.10.2026). – Текст : электронный.