УДК 622.831

Мальшин Анатолий Александрович, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Anatoly A. Malschin, *Associate Professor*, PhD of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД К ДИНАМИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ПО ИМПУЛЬСНОМУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ КАК ЭЛЕМЕНТ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

ASSESSMENT OF ROCKS' TENDENCY TO DYNAMIC FAILURE BY PULSED ELECTROMAGNETIC RADIATION AS AN ELEMENT OF INDUSTRIAL SAFETY IN MINING OPERATIONS

Аннотация (рус.)

В статье предложен способ оценки склонности горных пород к динамическому разрушению на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения в радио- и световом диапазонах. Приведены физические основы метода, алгоритм расчёта показателей склонности, критерии отнесения пород к удароопасным, а также количественная оценка вероятности удароопасности по серии испытаний. Метод позволяет повысить достоверность прогноза горных ударов и обеспечить производственную безопасность.

Abstract (Eng.)

The paper proposes a method for assessing the tendency of rocks to dynamic failure based on the registration of pulsed electromagnetic radiation in the radio and light ranges. The physical foundations of the method, the algorithm for calculating tendency indicators, criteria for classifying rocks as prone to rockbursts, and a quantitative assessment of the probability of rockburst hazard based on a series of tests are presented. The method improves the reliability of rockburst forecasting and ensures industrial safety.

Обеспечение производственной безопасности при ведении горных работ — обязательное требование законодательства [1] и ключевой элемент системы управления охраной труда [2], реализуемый в соответствии с общими стандартами [3] напрямую связано с достоверным прогнозом динамических проявлений горного давления, в первую очередь – горных ударов. Хрупкое поведение горных пород обусловлено их природной трещиноватостью, что делает классические модели механики разрушения

особенно актуальными для оценки удароопасности. В механике разрушения ключевым является установление критерия прочности, определяющего момент распространения трещин.

В механике разрушения принято выделять две стадии формирования повреждений: зарождение локальных дефектов и последующее их распространение. Согласно подходу А. А. Гриффитса [4], критическим условием для роста трещины в хрупком материале является превышение энергии, освобождаемой при развитии трещины, над энергией, необходимой для создания новой поверхности. Энергетическая природа разрушения подчёркивает, что определяющей характеристикой является именно энергетический параметр: в наиболее общей формулировке — внутренняя энергия тела; в частных случаях — свободная энергия (при изотермическом процессе) или работа деформации и разрушения (при адиабатическом).

Данная работа направлена на обоснование способа оценки склонности горных пород к динамическому разрушению по импульсному электромагнитному излучению в радио- и световом диапазонах как инструмент повышения производственной безопасности.

Согласно закону дробления Ребиндера [5], энергия $W_{\text{п}}$, подведённая к образцу, расходуется на общее деформирование и образование новых поверхностей:

$$W_{\text{п}} = \gamma S + \omega \Delta V, \tag{1}$$

где γ – удельная поверхностная энергия;
ω – объемная удельная энергия;
S – вновь образованная поверхность;
ΔV — пластически деформируемый объем.

Объемная удельная энергия деформирования породы зависит от вида напряжённого состояния, а удельная поверхностная энергия разрушения традиционно принимается за константу материала.

Физическая основа предлагаемого способа следует из закона сохранения энергии и экспериментально установленной закономерности: суммарная энергия импульсного электромагнитного излучения при трещинообразовании и разрушении горных пород представляет собой разность между высвобождаемой упругой энергией и необратимо поглощаемой образцом энергией [6,7]. Физическая интерпретация энергии импульсного ЭМИ как разности между высвобождаемой упругой энергией и необратимо поглощаемой энергией образца базируется на экспериментальных закономерностях, установленных в [6,7].Таким образом, величина энергии импульсного электромагнитного излучения несёт информацию о потенциальной способности горной породы накапливать упругую энергию и высвобождать её в динамической форме.

Для повышения достоверности прогноза удароопасности целесообразно ранжировать породы по степени склонности к хрупкому динамическому разрушению, принимая за эталон заведомо менее склонный к ударам материал. В качестве такого эталона используется мраморизованный доломит.

Методика оценки склонности пород к динамическому разрушению реализуется в лабораторных условиях при одноосном нагружении исследуемого и эталонного образцов до их разрушения с регистрацией кинетики импульсного электромагнитного излучения в радио- и световом диапазоне. Регистрация импульсного электромагнитного излучения в радио- и световом диапазонах и интерпретация его параметров выполнены по методике, описанной в [6].

Алгоритм оценки включает следующие шаги:

1. Деформация образцов в допредельной области нагружения с постоянной скоростью вплоть до разрушения.
2. Регистрация параметров импульсов: амплитуда, длительность и число радио- и световых импульсов.
3. Определение полной энергии регистрируемых импульсов для исследуемого и эталонного образцов.
4. Вычисление площади поверхностей образующихся микротрещин.
5. Расчёт поверхностной энергии излучения (энергия на единицу площади вновь образованной поверхности).
6. Оценка склонности к динамическому разрушению по соотношению поверхностных энергий исследуемого и эталонного материалов. В качестве порогового критерия удароопасности принято отношение поверхностных энергий более 100 — это согласуется с подходами, закреплёнными в методике ВНИМИ для условий рудных месторождений [7].

Существенные отличия метода:

1. Нагружение производится в допредельной области деформирования для точной оценки склонности;
2. Регистрируются амплитуда, длительность и число импульсов в радио- и световом диапазонах;
3. оценка производится по поверхностной энергии электромагнитного излучения, сопоставляемой с эталонным пластичным материалом.

Образцы горных пород отбираются с участков дискообразования керна при бурении разведочных скважин диаметром 42–59 мм. Толщина дисков керна – 20–30 мм, количество образцов – не менее 5 на 1 погонный метр участка дискообразования.

Образец помещается между инденторами нагружающего устройства и подвергается медленному нагружению. Сигналы импульсного электромагнитного излучения фиксируются счётчиком импульсов, а амплитуда и

длительность импульсов регистрируются осциллографами С8-12 в ждущем режиме.

При исследовании кинетики выделения импульсного электромагнитного излучения в радио- и световом диапазоне для образца гранодиорита с Константиновского месторождения в процессе нагружения было зарегистрировано

а) для радио излучения $N_р$=1156 радио- импульсов. Средняя амплитуда сигнала составила $\varphi_р=2{,}3\cdot10^{-2}$В, средняя длительность одного импульса $\tau_р=8\cdot10^{-5}$с, толщина образца равна $H=1{,}5\cdot10^{-2}$м.

Среднюю энергию радио- импульса рассчитываем по формуле:

$$W_{ср} \cong \frac{4\varepsilon\, cR^2\, \varphi^2\, \tau}{3\,\pi\, H^2} = 9{,}8\cdot10^{-12}\ \text{Дж}, \qquad (2)$$

где ε =9,5·10^{-12}Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость гранодиорита, c = 2,3·10^8 м/с – скорость распространения электромагнитной волны в гранодиорите, R = 7,5·10^{-3}м – среднее расстояние от источника излучения до точки приёма сигнала.

Суммарная энергия радио- излучения составляет:

$$W = N\cdot W_{ср} = 1{,}1\cdot10^{-8}\text{Дж}.$$

Площадь поверхности, образующихся микротрещин S = 4,34·10^{-3}м^2 , тогда величина поверхностной энергии радио- излучения при разрушении равна

$$\Delta W = W/S = 2{,}54\cdot10^{-6}\text{Дж/м}^2.$$

В качестве эталонного пластического материала использовался мраморизованный доломит, для которого аналогичным образом было получено значение поверхностной энергии радио- излучения при разрушении равное $\Delta W_{этал}$ = 1,2·10^{-8}Дж/м^2. Соотнося значения поверхностных энергий радио- излучения исследуемого и эталонного образцов, нашли их отношение – коэффициент k - являющийся, показателем оценки склонности горной породы к динамическому разрушению. Отношение этих величин составляет:

$$k = \Delta W/\Delta W_{этал} = 212.$$

б) для светового излучения регистрировался $N_с$=521 световой импульс. Средняя амплитуда сигнала составила $\varphi_с=3{,}1\cdot10^{-2}$В, средняя дли-

тельность одного импульса $\tau_c=1{,}6\cdot10^{-4}$с, толщина образца равна $H=1{,}5\cdot10^{-2}$м.

Среднюю энергию светового импульса считаем пропорциональной площади регистрируемого импульса в квадрате, следовательно:

$$I_{ср} = A\left(\frac{\varphi_c\,\tau_c}{2}\right)^2 = 0{,}065 \text{ отн.ед.},$$

где А – константа, зависящая от размеров образца, среднего расстояния от источника излучения до точки приёма сигнала. Значение средней энергии одного светового импульса (при $A=10^{10}$) 0,065отн.ед.

Суммарная энергия светового излучения составляет

$$I = N_c \cdot I_{ср} = 33{,}87 \text{ отн.ед.}$$

Величина суммарной энергии светового излучения I численно равна также произведению площади поверхности, образующихся микротрещин $S = 1{,}3\cdot10^{-3}$м^2 на величину поверхностной энергии светового излучения при разрушении $\Delta I = I/S = 2605$отн.ед. Величина поверхностной энергии светового излучения (при разрушении образца) является точной характеристикой её склонности к динамическому разрушению, так как определяется физическими свойствами, составом и строением самой горной породы. А соотношение поверхностных энергий излучения при разрушении горных пород позволяет с высокой точностью оценивать склонность горных пород к динамическому разрушению.

В качестве эталонного пластического материала использован мраморизованный доломит, для которого аналогичным образом было получено значение поверхностной энергии светового излучения при разрушении равное

$$\Delta I_{этал} = 14 \text{ отн.ед.}$$

Соотнося значения поверхностных энергий светового излучения исследуемого и эталонного образцов, находим их отношение – коэффициент q - являющийся, показателем оценки склонности горной породы к динамическому разрушению. Отношение этих величин составляет:

$$q = \Delta I/\Delta I_{этал} = 186.$$

При испытании серии из *n* образцов одной породы часть *m* результатов может давать k и q>100 (удароопасные), а остальные (*n*-*m*) результатов— <100, то есть не быть удароопасными. Вводится количественная оценка степени вероятности P отнесения горной породы к удароопасной:

- Если у всех *n* образцов k, q>100, то P=100%.
- Если ни у одного образца k,q>100k, то порода не удароопасна.
- В общем случае:

$$0 \le P = \frac{m}{n} \le 100\%$$

По результатам испытаний (по 12 образцов каждой породы) породы разделены на группы:

- P<10%: мраморизованный доломит, кальцитизированный мраморизованный доломит, метасоматическая карбонатная порода.
- P<55%: кварц-олигоклаз-пироксеновый роговик, метаморфическая порода, диоритовый порфирит, кварцевый роговик, скарн гранатовый.
- P>87% гранодиорит, плагиогранит, кварцевый диорит, сиенит.

Таким образом, величина P служит качественной характеристикой удароопасности горных пород и может использоваться для планирования мероприятий по обеспечению производственной безопасности. Критерии отнесения пород к удароопасным и порядок реагирования на выявленные риски интегрируются в процедуры СУОТ согласно [2] и общим требованиям стандарта [3], что соответствует нормам трудового законодательства [1].

Ранжирование участков по степени удароопасности и планирование профилактических мероприятий осуществляется в рамках СУОТ, требования к которой установлены [2, 3]. Это позволяет системно снижать риски и выполнять обязательства работодателя [1].

Предложенный способ позволяет:

- повысить достоверность прогноза удароопасности за счёт прямого измерения энергетических параметров разрушения;
- ранжировать участки месторождения по степени опасности и корректировать планы ведения горных работ;
- обоснованно выбирать режимы крепления, порядок отработки блоков и меры профилактики горных ударов;
- интегрировать результаты лабораторных испытаний в системы геомеханического мониторинга и управления рисками.

По результатам работы можно сделать следующие выводы

1. Способ оценки склонности горных пород к динамическому разрушению по импульсному электромагнитному излучению в радио- и световом диапазонах базируется на фундаментальных энергетических критериях разрушения и обеспечивает объективную количественную оценку удароопасности.
2. Ключевыми показателями являются коэффициенты k и q, отражающие отношение поверхностных энергий излучения исследуемой породы и эталона; при значениях более 100 порода классифицируется как удароопасная. Полученные значения коэффициентов k и q позволяют от-

нести гранодиорит к удароопасным породам в соответствии с критериями, принятыми в методике ВНИМИ [8].

3. Введение вероятностного критерия P позволяет учитывать неоднородность свойств пород и повышает надёжность прогноза.

4. Применение метода в комплексе с другими геомеханическими и геофизическими данными способствует снижению рисков динамических проявлений и повышению производственной безопасности на горных предприятиях.

Список литературы

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ.

2. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 776н «Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда».

3. ГОСТ 12.0.230-2007 «ССБТ. Системы управления охраной труда. Общие требования».

4. Гриффитс А. А. Теория разрушения хрупких тел. — М.: Наука, 1960.

5. Ребиндер П. А. Физико-химические основы дисперсных систем. — М.: Химия, 1979.

6. Изучение зависимости параметров импульсного электромагнитного излучения от размера структурной неоднородности твёрдого материала (статья) Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та, 2002. - №2. Егоров П.В., Колпакова Л.А., Мальшин А.А., Бабенко А.В.

7. Study of the kinetics of damage accumulation in loaded materials based on impulse electromagnetic and photon emission Russian Physics Journal, Springer New York. – V.52 №6, p.598-601 (Print) G. A. Kazunina, A. A. Mal’shin.

8. Методика ВНИМИ по оценке удароопасности участков рудных месторождений. — СПб.: ВНИМИ, 2020.