

УДК 622.235

П.В. Егоров, Л.А. Колпакова, А.В. Бабенко, С.С. Торгаев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Современное развитие технологии добычи угля характеризуется рядом особенностей, которые обуславливают необходимость разработки новых подходов к проблеме безопасного ведения горных работ. Интенсификация горных работ приводит к быстрому росту глубины разработки, которая своим разнообразием горно-геологических и горнотехнических условий приводит к возникновению динамических форм проявления горного давления в массиве горных пород. При этом все возрастающее значение приобретают методы непрерывного контроля состояния массива горных пород.

Перспективным, с точки зрения непрерывного контроля состояния горного массива считается метод, основанный на регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ). Данный метод не требует внедрения в массив горных пород, поэтому он является менее трудоемким, чем остальные. Однако расшифровка регистрируемых сигналов ЭМИ до сих пор остается открытым вопросом.

В результате деформирования образцов горных пород, эталонных образцов и одновременной регистрации сигналов импульсного ЭМИ было установлено, что каждому материалу соответствует своя частота электромагнитного излучения. Для песчаников регистрировались импульсы в диапазоне частот (0,1–10) МГц, для эталонных образцов ~ (10–20) кГц и для угля ~ (20–50) кГц.

Экспериментально было зарегистрировано, что различным зернистым горным породам соответствует индивидуальная форма импульса электромагнитного излучения с характерными точками перегиба, длительности переднего фронта и спада сигнала. Изменение длительности переднего фронта и спада сигнала приводит к расширению или сжатию формы импульса, но точки перегиба остаются характерными для каждого материала и могут быть объяснены развитием трещины в зернистых структурах.

Необходимо отметить, что формы импульсов электромаг-

нитного излучения зависят от РЦ – цепочки регистрируемой аппаратуры: приемного устройства, коэффициента усиления ( $K = 200$ ), фильтра низких частот и т. д. Все эти факторы рассматриваются как постоянная систематическая погрешность, поэтому при регистрации формы сигнала ЭМИ другой методикой она может быть в какой-либо степени изменена, но это изменение будет постоянным для данной методики.

На рис. 1, 2, а, б представлены формы сигналов, зарегистрированные при деформировании эталонных образцов:  $h = 30$  мм,  $n = 20\%$ ,  $d_3 = 0,5-1$  мм,  $P_i = 39$  МПа, где  $h$  – высота образца,  $n$  – концентрация песка в песчано-цементной массе,  $P_i$  – нагрузка в определенный момент времени (рис. 1) и  $h = 30$  мм,  $n = 10\%$ ,  $d_3 = 0,5-1$  мм при  $P_i = 37$  МПа (рис. 3, а), и при  $P_i = 51,8$  МПа ( $P_p = 74$  МПа), где  $P_p$  – разрушающая нагрузка (рис. 3, б). Из рис. 1 и 2, а, б видно, что формы импульсов, а именно характерные точки перегиба длительности переднего фронта и спада сигнала, не изменяются

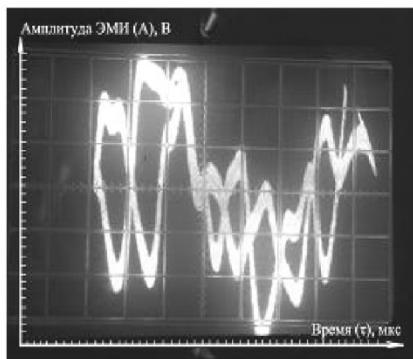


Рис. 1. Форма импульса ЭМИ, зарегистрированная при деформировании эталонного образца. Деление по горизонтали 10  $\mu$ s, по вертикали – 0,02 В,  $V_{sm} = 0,03 \cdot 10^3$  м/с.

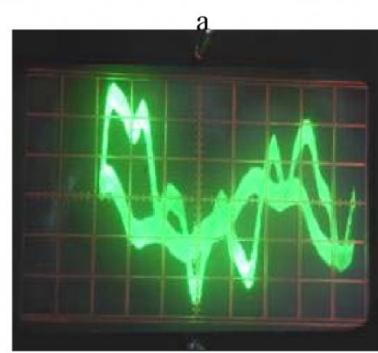
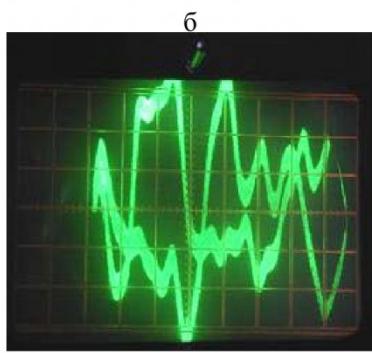


Рис. 2. Форма импульса ЭМИ, зарегистрированная при деформировании эталонного образца:

а) деление по горизонтали 0,02 мс, по вертикали – 0,02 В,  $\sigma_i = 37$  МПа,  $V_{sm} = 0,03 \cdot 10^3$  м/с; б) деление по горизонтали 0,02 мс, по вертикали – 0,02 В,  $P_i = 51,8$  МПа (при  $P_p = 74$  МПа),  $V_{sm} = 0,06 \cdot 10^3$  м/с (при  $V_p = 1,2 \cdot 10^3$  м/с)



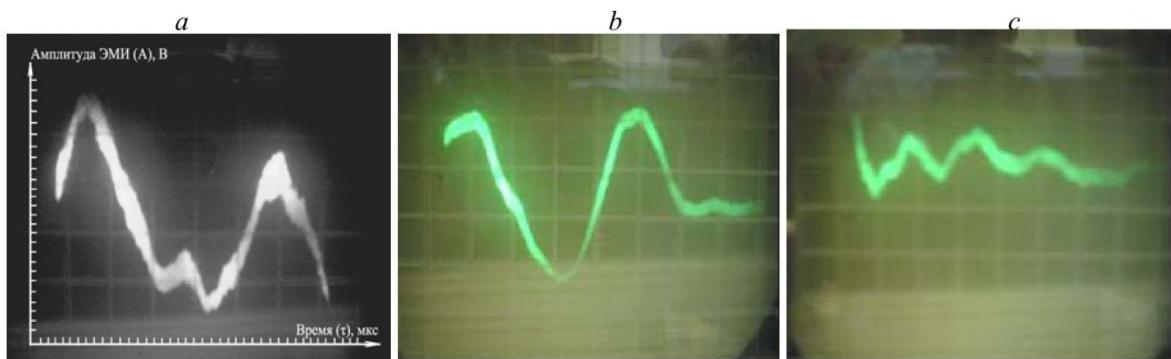


Рис. 3. Форма импульса ЭМИ, зарегистрированная при деформировании угля:  
а) деление по горизонтали 2  $\mu$ с, по вертикали – 0,02 В,  $V_{\text{эм}} = 0,11 \cdot 10^3$  м/с; б) деление по горизонтали 2  $\mu$ с, по вертикали – 0,04 В,  $P_i = 32$  МПа,  $V_{\text{эм}} = 0,15 \cdot 10^3$  м/с; в) деление по горизонтали 2  $\mu$ с, по вертикали – 0,04 В,  $P_i = 35,8$  МПа (при  $P_p = 74$  МПа) (при  $V_p = 1,27 \cdot 10^3$  м/с)

с увеличением концентрации заполнителя в образцах и при увеличении приложенной нагрузки.

Необходимо отметить, что при увеличении нагрузки происходит сжатие формы импульса за счет изменения длительности переднего фронта и спада сигнала.

Используя длительности переднего фронта электромагнитного сигнала и средние размеры образующихся трещин были рассчитаны скорости образования микротрещин ( $V_{\text{эм}}$ ) и теоретическая скорость раскола по формуле Берри, Робертса и Уэллса.

Значения скоростей приведены в подрисуночной надписи. Оказалось, что скорость образования микротрещин увеличивается на каждой стадии деформирования и меньше скорости образования трещины раскола

(рис. 2).

Сложная форма скорее объясняется природой импульса (механизмом процесса образования и релаксации заряда), а не наложением нескольких отдельных импульсов, т.к. пики следуют через  $10^{-4}$  с, при разрешающей способности осциллографа  $7 \cdot 10^{-9}$  с. Аналогичная форма импульсов наблюдалась и для всех остальных эталонных образцов.

На рис. 3 а,б,в показана форма импульса, которая зарегистрирована на образцах угля при  $P_i = 25$  МПа,  $P_i = 32$  МПа и  $P_i = 35,8$  МПа соответственно. Сигналы ЭМИ также характеризуются сложной формой.

На рис. 4 показана форма импульса, которая зарегистрирована на образцах песчаника. Сигнал ЭМИ характеризуется резким пиком, после чего происходит плавный спад сигнала.

Форма сигнала ЭМИ для песчаников имела колокообразный вид.

Разрешающая способность аппаратуры позволяла осуществлять разделение сигналов ЭМИ, соответствующие трещинам, которые возникали на границе раздела различных структур. Так на рис. 5, 6 зафиксированы импульсы, характеризующие переход разрушения из одного материала в другой в определенный момент времени при деформировании образцов с чередующимися материалами (уголь между двумя песчаниками). Из рис. 5, 6 видно, что при деформировании слоев различных структур, формы импульсов для конкретной структуры остаются постоянными, а скорости образования трещин в различных структурах в определенный момент времени различны. Наиболее быстрые им-

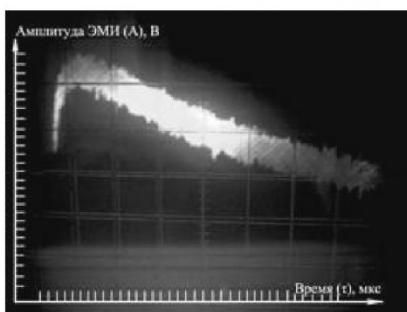


Рис. 4. Форма импульса ЭМИ, зарегистрированная при деформировании песчаников. Деление по горизонтали 1  $\mu$ с, по вертикали – 0,02 В,  $V_{\text{эм}} = 0,35 \cdot 10^3$  м/с (при  $V_p = 1,92 \cdot 10^3$  м/с)

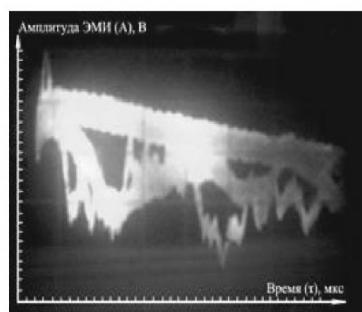


Рис. 5. Формы импульсов ЭМИ, зарегистрированные при деформировании образцов с чередующимися структурами №1. Деление по горизонтали 4  $\mu$ с, по вертикали – 0,01 В.

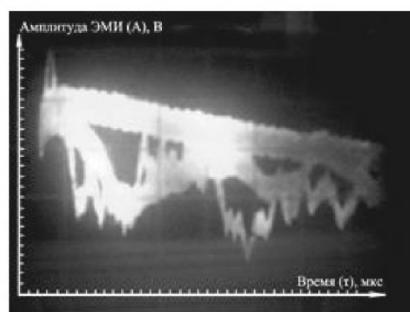


Рис. 6. Формы импульсов ЭМИ, зарегистрированные при деформировании образцов с чередующими структурами №1. Деление по горизонтали 2  $\mu$ с, по вертикали – 0,02 В.

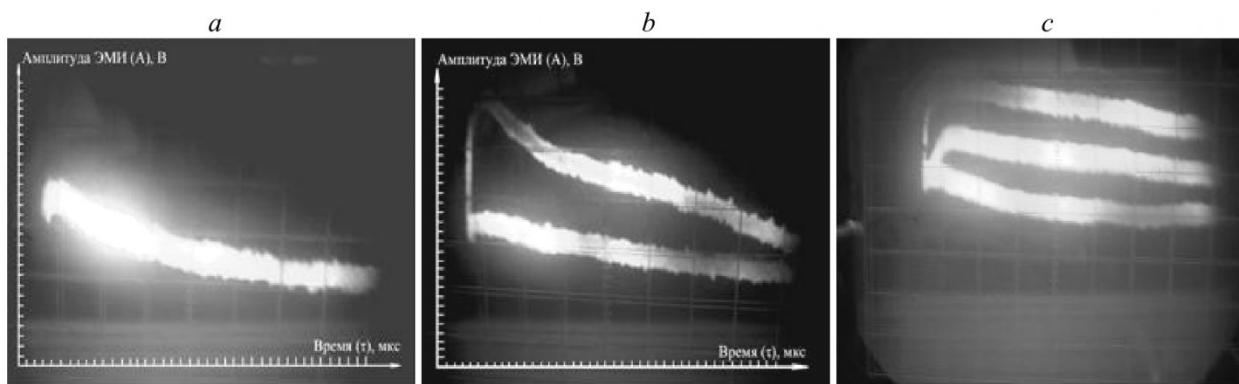


Рис. 7. Формы импульсов ЭМИ, зарегистрированные при деформировании песчаников:

а) Деление по горизонтали 2  $\mu$ s, по вертикали - 0,01 В,  $V_{\text{эм}} = 0,35 \cdot 10^3$  м/с; б) Деление по горизонтали 2  $\mu$ s, по вертикали - 0,02 В,  $V_{\text{эм}} = 0,8 \cdot 10^3$  м/с; в) деление по горизонтали 2  $\mu$ s, по вертикали - 0,02 В,  $V_{\text{эм}} = 0,8 \cdot 10^3$  м/с (при  $V_p = 1,92 \cdot 10^3$  м/с)

пульсы были характерны для песчаников (рис. 5, 6).

При увеличении нагрузки до  $P_i = 28$  МПа (при  $P_p = 74$  МПа, где  $P_p$  – разрушающая нагрузка) регистрировались пачки импульсов с различными формами (рис. 5, 6). Первым был импульс колоколобразной формы, соответствующий песчанику (рис. 5), имеющий короткую длительность переднего фронта с большей амплитудой и скорость трещинообразования  $V_{\text{эт}} = 0,35 \cdot 10^3$  м/с. Под ним расположен импульс ЭМИ, соответствующий трещине в угле со скоростью  $V_{\text{эт}} = 0,12 \cdot 10^3$  м/с (рис. 5). На рис. 5 также расположен импульс с характерными точками перегиба длительности переднего фронта и спада сигнала, соответствующий трещине в бетоне (в образце по краям присутствовал бетон). Его амплитуда превышала все остальные.

Формы импульсов образцов с чередующимися материалами (уголь между двумя песчаниками) на рис. 5 и 6 аналогичны регистрируемым формам импульса на конкретных образцах

горных пород угля и песчаника по отдельности (рис. 3, 4, 7). Необходимо отметить, что при деформировании чередующихся материалов, в момент регистрации пачки импульсов (рис. 5), скорость трещинообразования в каждом материале различна и совпадает со значением скорости при деформировании конкретного образца.

С увеличением нагрузки  $P$  временные и энергетические параметры сигналов ЭМИ изменяются. Так на рис. 7,а представлена форма сигнала импульса ЭМИ для образца песчаника на начальной стадии нагружения при  $P_i = 29$  МПа и со скоростью трещинообразования  $V_{\text{эт}} = 0,35 \cdot 10^3$  м/с. Сигнал ЭМИ на этой стадии нагружения характеризуется небольшой амплитудой.

При увеличении нагрузки до  $P_i = 66$  МПа (рис. 7,б) и до  $P_i = 71$  МПа (рис. 7,в) (при  $P_p = 94$  МПа) регистрируются пачки импульсов. Верхнему импульсу соответствует большая амплитуда и резкое нарастание длительности переднего фронта. На рис. 7,в представлена пачка им-

пульсов ЭМИ, причем каждый импульс характеризует образование трещины с разной скоростью. Верхний импульс соответствует образованию трещины со скоростью  $V_{\text{эт}} = 0,8 \cdot 10^3$  м/с, средний -  $V_{\text{эт}} = 0,12 \cdot 10^3$  м/с, нижний –  $V_{\text{эт}} = 0,8 \cdot 10^3$  м/с.

Таким образом, проведенный анализ форм сигналов импульсного электромагнитного излучения показывает, что образующейся трещине при деформировании зернистых материалов соответствует импульс с характерной формой и разной для каждой горной породы, а при увеличении нагрузки изменяются временные и энергетические параметры сигнала ЭМИ. Необходимо отметить, что при деформировании чередующихся горных пород скорость трещинообразования в каждом материале различна и совпадает со значением скорости при деформировании конкретной горной породы.

Работа выполнена при поддержке Конкурсного центра фундаментального естествознания Минобразования России (Шифр гранта PD02 – 1. 5 – 268)

#### □ Авторы статьи:

Егоров

Петр Васильевич  
- докт. техн. наук, проф.,  
зав. каф. разработки ме-  
сторождений полезных  
ископаемых подземным  
способом

Колпакова  
Любовь Александровна  
- канд. техн. наук, доц.  
каф. разработки месторо-  
ждений полезных иско-  
паемых подземным спо-  
собом

Бабенко

Александр Вячеславович  
- ст. преп. каф. разработки  
месторождений полезных  
ископаемых подземным  
способом

Торгаев

Сергей Сергеевич  
- магистр каф. разработки  
месторождений полезных  
ископаемых подземным  
способом