

УДК 622.813:550.34.03

**СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ДЛИНЕ ВЫЕМОЧНОГО СТОЛБА,
ОТРАБАТЫВАЕМОГО ДЛИННЫМ ОЧИСТНЫМ ЗАБОЕМ**

Й. Кужея

*Центральный горный институт,
E-mail: jkurzeja@gig.eu, ул. Пляц Гваркув, 1, 40166, г. Катовице, Польша*

Показано изменение коэффициента поглощения сейсмической энергии в зависимости от геологических и горнотехнических условий при разработке одного из длинных забоев на угольной шахте “Руда” в Польше. Применялся метод определения затухания, основанный на адаптированной модели сейсмоакустической эмиссии. Рассмотрено пять стадий разработки массива длинным забоем при различном напряженном состоянии массива. Установлено, что в областях концентрации высоких напряжений затухание имеет слабо выраженный характер, а в областях ослабленного массива горных пород наблюдается сильное затухание сейсмической энергии.

Угольный пласт, затухание сейсмических волн, коэффициент поглощения, сейсмическая угроза

DOI: 10.15372/FTPRPI20200605

Возникающая в массиве горных пород сейсмическая волна характеризуется постепенным снижением максимальной амплитуды и частоты в зависимости от расстояния до источника, т. е. массив способствует затуханию и поглощению волн. В причинах такого явления можно выделить два момента. Первый связан с законом сохранения энергии при движении фронта волны (геометрический эффект), второй — с активным затуханием ввиду наличия неоднородных включений и неупругого поведения массива [1 – 3]. Помимо геометрического затухания в соответствии с законом сохранения энергии, в трехмерной реальной среде присутствует поглощение энергии волны средой, приводящей к экспоненциальному уменьшению волны с амплитудой A по мере ее распространения [4, 5]. Это поглощение подчиняется в общем виде уравнению

$$A(x_2) = A(x_1) \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^n \exp[-0.5\gamma(x_2 - x_1)],$$

где n , γ — параметры соотношения; x_1 , x_2 — координаты точек наблюдения.

Если распространение волны происходит в одном слое многослойной среды, например в угольном пласте, то поверхность фронта волны увеличивается пропорционально расстоянию, $n = 0.5$, а амплитуда уменьшается по закону [6, 7]:

$$A(x_2) = A(x_1) \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^{0.5} \exp[-0.5\gamma(x_2 - x_1)].$$

Значение γ напрямую зависит от участка прохождения сейсмической волны. Участок может представлять собой боковую стенку забоя с некоторым количеством трещин или пласт без них. Из-за неоднородности среды и технических причин измерение активного затухания волн в угольных пластах значение γ характеризуется значительной вариацией. Для получения корректных результатов измерения должны повторяться много раз и по ним рассчитываться средние значения с помощью методов, учитывающих надежность каждого измерения [2].

В руководстве, применяемом для оценки угрозы горных ударов, в рамках угледобывающей промышленности Польши содержатся ссылки на параметр затухания [8]. Определение коэффициента затухания необходимо при сейсмоакустическом мониторинге длинных забоев, а также в случаях использования параметра сейсмоакустической энергии при общем мониторинге энергии сейсмической эмиссии [9].

Цель настоящей работы — определение коэффициента активного затухания сейсмической волны при изменении напряженного состояния массива в процессе разработки угольного пласта длинным забоем на шахте “Руда” Верхнесилезского каменноугольного бассейна. Представлены примеры оценки параметра затухания γ в соответствии с адаптированной моделью, основанной на мониторинге акустической эмиссии (АЭ). Во время добычи угля длинными забоями сейсмоакустический мониторинг осуществлялся с помощью четырех стационарных геофонов ARES-5/E [10]. Увеличение количества используемых датчиков (со стандартных двух до четырех) позволило получить данные для корреляции параметров активного затухания с изменяющимися горнотехническими и геологическими условиями. В частности, получение различных значений затухания обусловлено проведением очистных работ на разных участках забоя.

ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЯЕМОГО МЕТОДА

Для анализа затухания амплитуды волны по длине панели длинного забоя использовалась АЭ-модель [9, 11]. В случае наблюдений акустической эмиссии при разработке длинного забоя с помощью N геофонов зависимость между АЭ-энергией EU , которая в компьютерном расчете является выходным параметром, и физической АЭ-энергией E , выделяемой за единицу времени, выражается системой уравнений:

$$EU_i = EC_2 \frac{d_i I_0(\gamma, L, d_i)}{Lh}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Здесь C_2 — параметр, зависящий от используемого в наблюдениях сейсмоакустического оборудования и физических свойств среды (удельный вес породы и скорость распространения сейсмической волны); d — расстояние от датчика до пересечения с длинным очистным забоем; L, h — длина и высота забоя; $\gamma = 2\alpha$ — коэффициент поглощения; α — коэффициент затухания амплитуды волны; I_0 — функция, которая интерпретируется как совокупная пропускная способность пути прохождения волны от местоположения источника до геофона с учетом его характеристик:

$$I_0(\gamma, L, d_i) = \int_0^L (x^2 + d_i^2)^{-0.5} e^{-\gamma(x^2 + d_i^2)^{0.5}} \left(0.111 + \frac{|x|}{(x^2 + d_i^2)^{0.5}} \right)^2 dx.$$

Систему уравнений (1) целесообразно решать относительно неизвестных значений E, γ , используя компьютерную программу, обеспечивающую минимальную квадратичную ошибку для определяемых величин. В этом случае ошибка — разница между наблюдаемыми E и расчетными значениями EU_i , т. е. между левой и правой сторонами уравнения (1). Иными словами, нужно найти E, γ , соответствующие следующему условию:

$$(E, \gamma) = \min_{E, \gamma} \sum_{i=1}^N \left(EC_2 \frac{d_i I_0(\gamma, L, d_i)}{Lh} - EU_i \right)^2, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Сумма квадратичных ошибок неотрицательна и достигает нуля при условии, если рассчитанные прогнозируемые значения полностью совпадают с наблюдаемыми. Когда сумма квадратичных ошибок не равна нулю, ее значение позволяет оценить качество прогноза значений E, γ .

Рассмотренный метод оценки коэффициента затухания γ представлен в форме компьютерной программы, состоящей из двух частей:

- расчет интеграла I_0 , зависящего от параметров γ, L, d , стандартным методом Симпсона;
- минимизация целевой функции (уравнение (2)).

Входные параметры программы:

- значения энергии EU_i , полученные в качестве выходных данных системы ARES-5/E с двух крайних каналов наблюдения в длинном забое;
- текущие расстояния d i -х геофонов до пересечения с длинным очистным забоем;
- длина забоя L , высота забоя h , выходной параметр системы ARES-5/E $C_2 = 187.3131$ при удельном весе пласта $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ и скорости распространения волны $V = 1800 \text{ м/с}$.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Представленная модель эмиссии использовалась для оценки коэффициента затухания в натуральных условиях, соответствующих разработке длинного очистного забоя в угольной шахте “Руда” (рис. 1). Очистной забой обрабатывает пласт 414/1. Пласт залегает на глубине 718–765 м, его мощность составляет от 0.6 м (вымывание пласта) на юго-западе до 3.95 м на западе. Добыча угля проводилась на всю мощность пласта, залегающего на расстоянии 129 и 120 м до вышележащих пластов 410 и 411. Очистной забой двигался с востока на запад по длине выемочного столба, разрабатываемого по простиранию. Изначально длина забоя составляла ~200 м, после достижения 300 м он расширился до 400 м. Для выявления угрозы обрушения применялся сейсмоакустический метод, т. е. мониторинг кровли выработки [8].

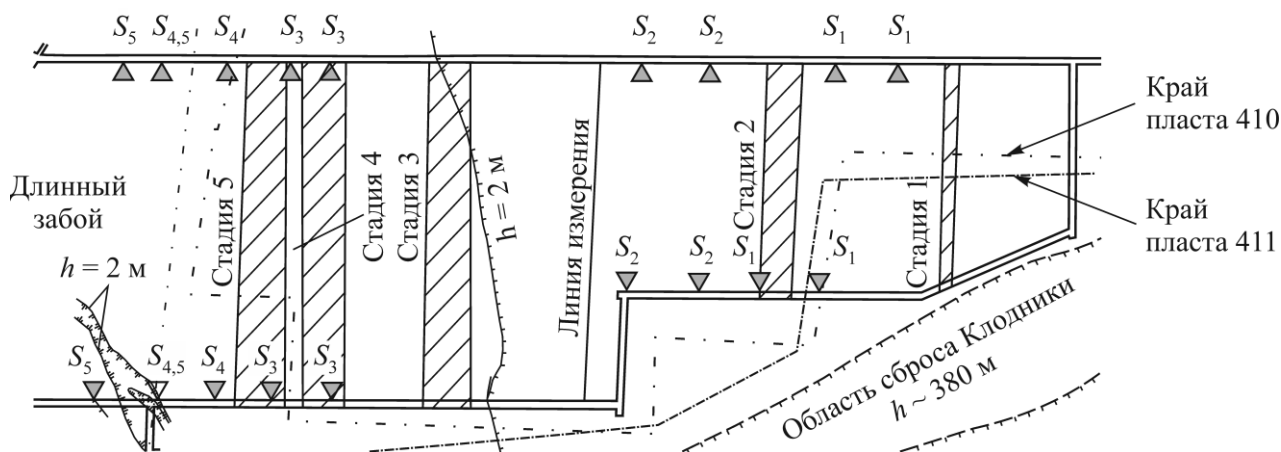


Рис. 1. Испытательная площадка: S_1 – S_5 — местоположения геофонов на стадиях 1–5

В процессе разработки пласта обнаружены следующие геологические особенности:

- наличие сброса $h = 2$ м на юго-востоке примерно на половине длины панели;
- в западной части забоя снижение мощности пласта на 0.7 м и наличие сброса $h = 0.3$ м.

В ходе эксплуатации длинного очистного забоя, которая длилась около года, непрерывно наблюдалась акустическая эмиссия четырьмя геофонами стационарного оборудования ARES-5/E (по два геофона на оба входа в забой на каждой стороне). В процессе движения забоя датчики систематически переустанавливались, наблюдения осуществлялись один раз в час. Собрано значительное количество данных акустической эмиссии с учетом изменения расстояния установки датчиков до пересечения с очистным забоем по мере продвижения фронта работ.

После достижения фронтом работ отметки 300 м проведен измерительный эксперимент для оценки коэффициента затухания сейсмической волны. Локальные измерения выполнены с помощью портативного оборудования. Сейсмоакустические изменения, вызванные взрывными работами в угольном забое, фиксировались 8 сейсмоакустическими зондами CSSP, установленными в штреке. На рис. 1 показано расположение фронта забоя (линия измерений). Медиана результатов оценки коэффициента затухания волны за один взрыв равна 0.024 м^{-1} .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из-за геологических нарушений, наблюдаемых в забое и на флангах выработки в налегающих пластах 410 и 411, получено несколько наборов данных, включающих почасовое сейсмоакустическое измерение четырьмя геофонами. Назовем эти наборы стадиями, характеризующимися одинаковой геометрией системы датчиков на определенном участке подвигания забоя. Это означает, что в анализируемый период оборудование не переустанавливалось. На рис. 1 стадии показаны с указанием предельных значений фронта забоя в анализируемые интервалы времени:

- стадия 1, подвигание забоя на 186 м перпендикулярно флангам выработанных пластов 410 и 411 вдоль области сброса Клодники $h \sim 380$ м;
- стадия 2, фронт добычи отходит от области Клодники и располагается ниже пластов 410 и 411;
- стадия 3, забой длиной ~ 300 м проходит через локальный сброс в пласте со сбросом $h = 2$ м;
- стадия 4, добыча ведется под полностью выработанными пластами 410 и 411, как на стадии 2, но длина фронта на ~ 100 м больше;
- стадия 5, добычный забой достигает области влияния пласта 410.

После удаления значений, равных нулю, оценивались средние значения коэффициента затухания на последующих стадиях. Нулевые значения γ , по-видимому, появились ввиду неизбежных ошибок в оценке традиционной энергии акустической эмиссии или некорректной оценки расстояния датчиков от фронта забоя.

Результаты оценки коэффициента активного затухания энергии γ в пласте по фронту работ длинного забоя представлены на рис. 2. Чтобы сократить разброс результатов, являющийся неизбежностью ввиду влияния на измерительные приборы со стороны техники и персонала, проведена фильтрация полученных значений с учетом восьмичасового рабочего цикла: $\gamma_{fil}(t) = 1 / [8\gamma_{est}(t)] + 7 / [8\gamma_{fil}(t-1)]$.

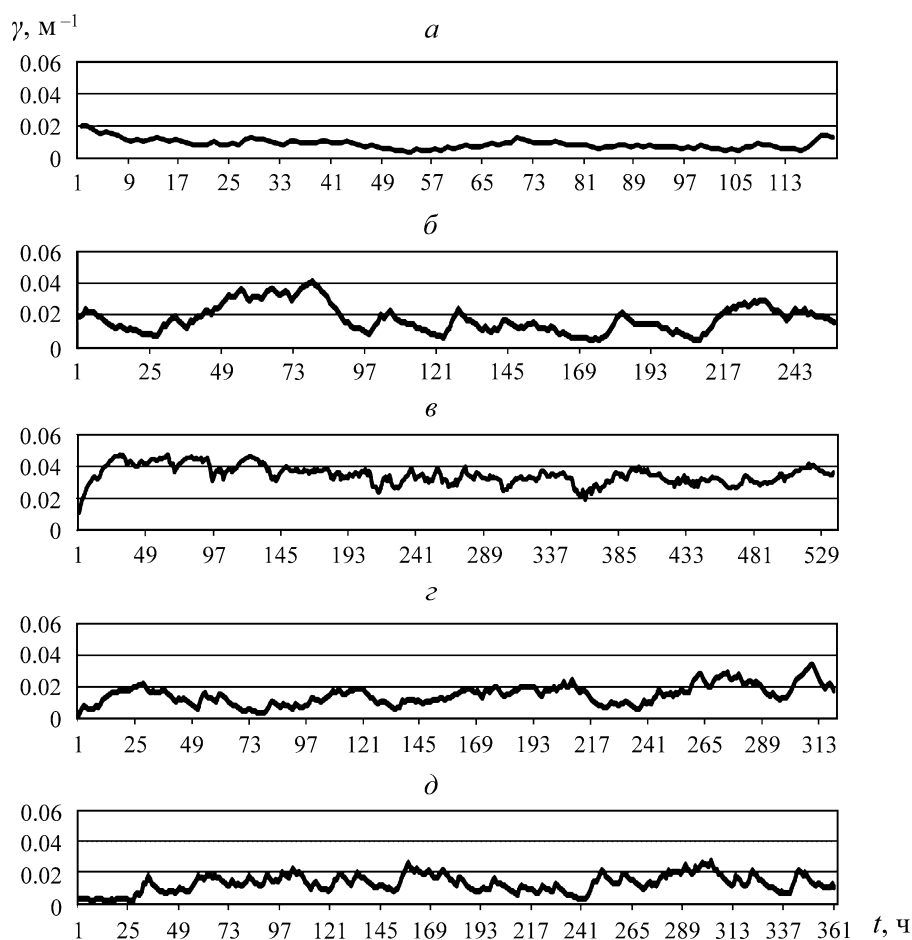


Рис. 2. Оценка коэффициента затухания на стадиях 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д)

Статистика измерений на стадиях 1–5 представлена в табл. 1, где дополнительно включена информация об их вариации. Анализ нормальности распределения значений затухания осуществлялся с помощью критерия Шапиро–Вилка, анализ равномерности вариации — критерием Левина. С учетом того, что распределение параметра γ отличается от нормального и на сравниваемых стадиях не наблюдается равномерности вариации, для дальнейшего изучения применен метод непараметрических исследований. В ходе анализа рассчитан U -критерий Манна–Уитни для сравнения распределений затухания между стадиями. Все расчеты выполнялись в программном обеспечении Statistica [12] при предельном уровне значимости $p = 0.05$.

ТАБЛИЦА 1. Сводная статистика эффективных значений затухания γ на шахте “Руда”

Стадия	Среднее значение γ , м ⁻¹	Медиана γ , м ⁻¹	Вариация	Количество проанализированных измерений / количество полезных измерений
1	0.013	0.011	$8.2 \cdot 10^{-5}$	120 / 77
2	0.022	0.021	$2.4 \cdot 10^{-4}$	254 / 204
3	0.037	0.037	$1.3 \cdot 10^{-4}$	538 / 515
4	0.022	0.021	$1.4 \cdot 10^{-4}$	321 / 218
5	0.016	0.010	$2.3 \cdot 10^{-4}$	361 / 303

При расчете U -критерия Манна–Уитни сделано допущение: два значения, взятые из одной выборки, т. е. при одних и тех же горнотехнических и геологических условиях, не изменяют среднее значение затухания по фронту длинного забоя. В конечном итоге полученные значения сравнивались со стадиями со схожими горнотехническими и геологическими условиями (стадия 2 сравнивалась со стадией 4, стадия 1 с 5) и со стадиями, имеющими различные условия (стадии 1, 2, 3, 4). Результаты обобщены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета U -критерия Манна–Уитни для сравниваемых стадий

Сравнение γ на стадиях	Сумма рангов		U	Z	p	Коррек- тировка Z	p	Количество подтвержденных значений N	
	Стадия 2	Стадия 4						Стадия 2	Стадия 4
2 и 4	42076.5	46754.5	21370.5	-0.606010	0.544508	-0.606125	0.544432	203	218
1 и 5	57887.0	14503.0	11500.0	0.191710	0.847969	0.191721	0.847961	303	77
1 и 2	31245.0	8095.0	5092.0	4.500821	0.000007	4.501716	0.000007	203	77
3 и 4	44498.5	224512.5	20627.5	-13.5495	0	-13.5841	0	218	515

Примечание. Результаты значимы при $p > 0.05$

Согласно табл. 2, определенный параметр $p \geq 0.05$ в некоторых случаях подтвердил значимость вывода о том, что похожие горнотехнические и геологические условия не изменяют среднее значение активного затухания. Это наблюдается на стадиях 1, 5 и 2, 4. Тем не менее различные горнотехнические и геологические условия (стадии 1, 2 и 3, 4) привели к тому, что полученные значения затухания не принадлежали одной и той же выборке ($p < 0.05$).

На основе результатов испытаний и статистического анализа (табл. 1) можно заключить, что:

- средние значения активного затухания изменяются в процессе эксплуатации забоя;
- во время прохода фронта забоя под флангами выработанных пластов 410 и 411, залегающих на расстоянии ~ 120 м, коэффициент активного затухания имеет схожие значения из-за длины фронта добычи (на отметке забоя ~ 200 м на стадии 1 медиана значений γ составила 0.011 м^{-1} , на стадии 5 — 0.010 м^{-1});
- в результате разработки забоя под полностью выработанными пластами 410 и 411 (стадии 2 и 4) получены одинаковые медианы $\gamma = 0.021 \text{ м}^{-1}$, что подтверждается результатами на разных отметках длины забоя;
- значения коэффициентов активного затухания в области влияния на флангах пластов 410 и 411 меньше по сравнению со значениями, полученными в зоне добычи под выработанными пластами. Наибольшее значение $\gamma = 0.037 \text{ м}^{-1}$ наблюдается при прохождении забоя частично через сброс в пласте (табл. 2, стадия 3);
- средний коэффициент затухания при разработке забоя, измеренный с помощью портативного сейсмоакустического оборудования, равнялся 0.024 м^{-1} , что является близким к его значениям на стадиях 2, 4 ($\gamma = 0.021 \text{ м}^{-1}$) и подтверждает сходство напряженных состояний;
- определен относительный риск возникновения горного удара, выполненный с помощью метода [6] на основе измерений коэффициента затухания для шахты “Руда”. В целом опасность не выявлена, лишь иногда наблюдалось состояние низкой угрозы.

ВЫВОДЫ

На основе сейсмоакустических данных испытан метод определения коэффициента затухания на одном из длинных забоев шахты “Руда” (Верхнесилезский каменноугольный бассейн, Польша). Рассмотренные пять стадий эксплуатации забоя с разными горнотехническими и геологическими условиями продемонстрировали значительную вариацию коэффициента затухания. Статистический анализ непараметрического U -критерия Манна–Уитни показал, что похожие горнотехнические и геологические условия не изменяют среднее значение коэффициента затухания. Выявлена корреляция между значениями коэффициента затухания и его вариациями из-за наличия флангов выработанных налегающих пластов и неоднородностей в структуре угольного пласта: низкое затухание происходит в областях концентрации высоких напряжений, сильное — в ослабленном массиве горных пород. Детальный метод оценки угрозы обрушения совместно с другими корректными методами не показал состояния высокой угрозы.

Корреляция коэффициента затухания с горнотехническими и геологическими условиями рассмотрена на разных стадиях при разработке длинного забоя длиной 200 м и при длине фронта ~ 300 м. Выводы проведенного анализа в условиях длинного забоя подтверждаются методом наблюдения, описанного в польских стандартах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bańka P., Lier E., Fernandez M. M., Chmiela A., Muniz Z. F., and Sanchez A. B.** Directional attenuation relationship for ground vibrations induced by mine tremors, *J. Min. Sci.*, 2020, Vol. 56. — P. 236–245.
2. **Kornowski J.** Basics of seismoacoustic assessment and forecasting of seismic hazard in mining (in Polish), Poland, Katowice, Central Mining Institute, 2002, ISBN 83-87610-41-0.
3. **Toksöz M. N., Dainty A. M., Reiter E., and Wu R. S.** A model for attenuation and scattering in the Earth Crust. W: Aki i Wu (eds.), *Pure Appl. Geophys.*, 1988, Vol. 122, No. 1–2. — P. 81–100.
4. **Schön J. H.** Physical properties of rock: Fundamentals and principles of petrophysics, New York, Pergamon Press, 1996. — 562 p.
5. **Liu X. L., Han M. S., Li X. B., Cui J. H., and Liu Z.** Elastic wave attenuation characteristics and relevance for rock microstructures, *J. Min. Sci.*, 2020, Vol. 56, No. 2. — P. 216–225.
6. **Isakow Z.** Geotomography with the help of a cutter-loader working organ as a source of imaging waves, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2009, Vol. 46. — P. 1235–1242.
7. **Szreder Z., Pilecki Z., and Klosiński J.** Effectiveness of recognition of the impact of operational edges by methods of attenuation profiling and seismic wave velocity (in Polish), *IGSMiE PAN*, 2008, Vol. 24, Issue 2–3. — P. 215–226.
8. **Barański A., Drzewiecki J., Dubiński J., Kabiesz J., Konopko W., Kornowski J., Kurzeja J., Lurka A., Makówka J., Mutke G., and Stec K.** Guidelines for application of the comprehensive method and specific methods for rockburst hazard assessment in coal mines (in Polish), *Guidelines Series*, 2012, No. 22. — P. 81.
9. **Kornowski J. and Kurzeja J.** Short-term forecast of seismic hazard in mining (in Polish), Poland, Katowice, Central Mining Institute, 2008, ISBN 978-83-61126-17-1.
10. **Isakow Z., Krzystanek Z., Tenczek S., and Wojtas P.** Gas and rock-bump hazard monitoring in the Polish mining, *J. Coal Sci. and Eng. (China)*, 2009, Vol. 15, No. 3. — P. 229–232.
11. **Kurzeja J. and Kornowski J.** Estimation of seismoacoustic energy and absorption coefficient in the seam in front of the mined longwall (in Polish), *Research Reports Min. and Env.*, Central Mining Institute, 2009, Vol. 4. — P. 41–54.
12. **Statistica 13.3.** Tibco Software Inc., <https://support.tibco.com>.

*Поступила в редакцию 31/I 2020
После доработки 26/VIII 2020
Принята к публикации 03/XI 2020*