



I ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.37.65.001

УДК 622.831.322

© А. В. Шадрин, 2025

А. В. ШАДРИН

д-р техн. наук,

главный научный сотрудник

Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,

г. Кемерово

e-mail: avsh-357@mail.ru



О НЕМОНОТОННОМ ХАРАКТЕРЕ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ

Рассмотрены методы прогноза геогазодинамических явлений в угольных шахтах, основанные на спектральном анализе акустического излучения, генерируемого в массив работающим рабочим органом горного оборудования. Прогноз этими методами возможен благодаря прямо пропорциональной зависимости коэффициента затухания звука в твердом теле от частоты и обратно пропорциональной зависимости от горного давления. При этом предполагается, что амплитуда сигнала экспоненциально убывает с увеличением расстояния от излучателя до сейсмоприемника. Однако эксперименты показали, что убывание амплитуды с расстоянием происходит немонотонно. Предположено, что это объясняется интерференцией различных типов волн, генерируемых источником и имеющими различную скорость распространения. Приведены результаты численного моделирования интерференции продольных и поперечных колебаний на амплитуду затухания результирующей акустической волны в углепородном массиве по мере удаления от источника. По условиям задачи источник звука представлен линейчатыми спектрами семи пар продольной и поперечной волн, каждая из которых имеет одинаковую частоту и начальную амплитуду, и нулевую начальную фазу. Частоты гармоник, каждая из которых является суммой гармоник исходного спектра в окне шириной 200 Гц, имеют частоты середины окна, равные соответственно 100, 300, 500, 700, 900, 1100 и 1300 Гц. В результате моделирования установлено, что благодаря различной скорости продольных и поперечных волн на некоторых удалениях от источника эти колебания приходят в фазе, в результате амплитуда колебаний суммируется, а на других удалениях колебания приходят в противофазе и результирующая амплитуда является результатом разности амплитуд интерферирующих волн. Численный эксперимент подтвердил правильность предположения об интерференции типов волн как возможной причине немонотонного убывания амплитуды «шума» горного комбайна с удалением от него.

Ключевые слова: УГЛЕПОРОДНЫЙ МАССИВ, ТЕКУЩИЙ ПРОГНОЗ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН, КОЭФФИЦИЕНТ ЗАТУХАНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Ведение горных работ на угольных шахтах осложнено проявлением геогазодинамических явлений (ГДЯ). Первым из комплекса мероприятий по борьбе с ними является прогноз, который на глубинах ниже критической, обязательно включает один из его подвидов, а именно — текущий [1, 2]. Среди текущих методов прогноза наиболее достоверными являются инструментальные. Однако они более продолжительные и трудоемкие. Поэтому в последние десятилетия все более широко внедряются в практику геофизические методы прогноза, мало мешающие ведению горных работ. Между тем сравнительный анализ применения инструментальных и геофизических методов показал, что последние, в зависимости от области применения и используемого оборудования, в меньшей или большей степени уступают инструментальным по достоверности [3]. Поэтому весьма важны исследования, направленные на совершенствование геофизических методов прогноза ГДЯ. Эти исследования особенно востребованы в настоящее время для угольной промышленности Кузбасса, переживающей сложный период в связи с высокой себестоимостью реализации угля. Более широкое применение геофизических методов прогноза ГДЯ позволило бы снизить себестоимость добычи угля. Однако это возможно только при обеспечении этими методами высокой достоверности прогноза.

Наиболее перспективно в этой связи совершенствование текущих геофизических методов прогноза горных ударов и внезапных выбросов угля и газа, основанных на спектральном анализе акустического излучения, генерируемого в углепородный массив работающим горным оборудованием [1, 4–7].

Основой этих методов является зависимость коэффициента затухания звука в горном массиве от частоты и горного давления, которую можно выразить следующей формулой [6, 8]:

$$\alpha_i = \alpha_0 + \beta \frac{f_i}{f_0} \frac{\sigma_{np}}{\sigma_m}, \quad i \in (M_0; M_{max}), \quad (1)$$

где α_i — затухание i -й гармоники, м^{-1} ; α_0 — затухание гармоники с самой низкой частотой рабочего диапазона сейсмоприемника в отсутствии напряжений, м^{-1} ; β — параметр, названный нами динамическим коэффициентом затухания, определяемый свойствами массива, м^{-1} ; M_0 и M_{max} — соответственно номер гармоники с самой низкой и самой высокой частотой рабочего диапазона используемого для прогноза оборудования.

Такая зависимость позволяет путем разбиения частотного диапазона на низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ) части определить следующим образом коэффициент относительных напряжений K контролируемого участка пласта [4–8]:

$$K = \frac{A_{\text{B}}}{A_{\text{H}}}, \quad (2)$$

где A_{B} и A_{H} — соответственно текущие значения амплитуд ВЧ и НЧ областей спектра, В.

В однородном твердом теле амплитуду акустического излучения $A(f, r)$ на расстоянии r от источника можно выразить следующим образом [9, 10]:

$$A(f, r) = a_0(f) R(r) e^{-\alpha r}, \quad (3)$$

где a_0 — амплитуда сигнала у источника, В; $R(r)$ — показатель расхождения волнового фронта акустических колебаний, определяемый диаграммой направленности источника; $\alpha(f)$ — коэффициент затухания, м^{-1} .

Определение амплитуд спектральных составляющих сложного сигнала вида (3) осуществляется путем быстрого Фурье преобразования временных последовательностей отсчетов при цифровой обработке зарегистрированных сейсмоприемниками сигналов.

Как видно из выражения (3), амплитуда сигнала с расстоянием уменьшается монотонно по экспоненциальной зависимости. Однако экспериментальные исследования показали, что монотонность нарушается и иногда на убывающую зависимость накладывается осциллирующая составляющая [11, 12].

Существует несколько подходов к объяснению немонотонного убывания амплитуды с удалением от источника. Так, в работе [13] осцилляции амплитуды сейсмических волн в зависимости от длины базы наблюдений объясняется с позиции предложенной автором модели для описания физических процессов в Земле. Основу этой модели составляет предположение о том, что объем Земли, в котором распространяются акустические волны, можно представить состоящим из двух движущихся компонентов, массы которых составляют в сумме массу этого объема в его статическом состоянии. Данные объемы имеют определенные свойства, обеспечивающие выполнение ряда фундаментальных законов: сохранения массы, сохранения количества движения и момента количества движения, а также в ней учитываются массовые стационарные и нестационарные силы, действующие в Земле. Не высказывая никаких суждений по поводу справедливости данной теории, покажем, что существует и другой, более понятный механизм объяснения немонотонности уменьшения амплитуды акустического сигнала с расстоянием.

Углепородный массив представляет собой неоднородную слоистую структуру, в которой происходят отражения акустических волн от границ раздела угольного пласта с вмещающими породами, имеющими различные акустические импедансы (произведение плотности среды и скорости звука в ней). Поэтому от широкополосного источника акустических колебаний, каковым является рабочий орган горного оборудования, воздействующего на массив (угольный комбайн, фреза буровой установки или ручного сверла), ударное воздействие молотком или кувалдой по борту выработки или даже взрыв, распространяются продольные и поперечные волны. Благодаря отражениям этих волн от границ раздела слоев массива и интерференции этих отражений с первичными волнами по пласту распространяется каналовая волна [11]. При отражении волн от границ раздела может происходить трансформация типов волн и образование поверхностных волн [11].

Причем различные типы волн имеют разную скорость распространения [9–12]. Покажем, что это также может приводить к немонотонному характеру изменения амплитуды результирующей волны по мере удаления от источника.

Цель настоящей работы — численным моделированием исследовать влияние интерференции продольных и поперечных колебаний на амплитуду затухания результирующей акустической волны.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

Интерференцию продольных и поперечных волн будем моделировать путем суммирования гармоник, входящих в спектр продольных и поперечных волн, описываемых выражением (3). Для этого необходимо задать параметры исходного спектра у источника $A_0(f)$ для продольной и поперечной волн, функцию $R(r)$, а также коэффициент затухания α раздельно для обоих типов волн.

Количество гармоник и параметр α приближенно определим исходя из параметров реально зарегистрированных спектров акустических сигналов, генерируемых в массив работающим проходческим комбайном, при прогнозе ГДЯ. Эти параметры зависят от строения и прочностных свойств угольного пласта и вмещающих пород, горного давления, а также от типа комбайна и его удаления от сейсмоприемников (СМП), установленных в борт выработки.

Для регистрации акустических сигналов использовали многоканальную аппаратуру типа «Микон-ГЕО» с пятью трехкомпонентными СМП, расположенными на разном удалении от забоя выработки. Это позволило изучить влияние расстояния между излучателем и приемником на спектр сигнала. Для этого осуществляли регистрацию сигналов одновременно всеми СМП. Поскольку генерируемый сигнал существенно зависит от усилия воздействия рабочего органа на массив, которое меняется в процессе работы, от

перемещения рабочего органа комбайна по поверхности забоя, а также от прочностных свойств угля по мере углубки рабочего органа комбайна после его остановки на время крепления выработки, осуществляли усреднение амплитуд спектра во времени. По-видимому, лучший интервал усреднения равен времени между циклами прекращения работы комбайна для возведения крепи. За это время комбайн проходит выработку на глубину, соизмеримую с интервалом контрольной скважины, равный 1 м, с которого измеряют выход штыба и/или начальную скорость газоизделия при прогнозе ГДЯ инструментальными методами [1].

Параметры цифровой обработки сигналов выбирали исходя из следующих соображений. Поскольку максимальная регистрируемая частота рабочего диапазона СМП достигает значения 1,6 кГц и более, частота дискретизации в соответствии с теоремой отсчетов Котельникова была выбрана не менее чем в два раза превышающей максимальную частоту регистрируемого сигнала, а именно $f_d = 4$ кГц. Длительность экспериментальных выборок составляла 2000 отсчетов. Полученные при этих параметрах спектры имели достаточно высокое разрешение, что для прогноза ГДЯ носило избыточный характер, усложняющий обработку. Поэтому применяли усреднение спектров в частотных окнах шириной 20 Гц.

На рис. 1 показан линейчатый спектр сигнала, генерируемый комбайном КП-21, зарегистрированный пятью СМП, удаленными соответственно на расстояние 11; 21; 31; 47,7 и 57,7 м от забоя выработки, с усреднением амплитуд гармоник в интервал времени, равный 18 минутам, и в частотных окнах по 20 Гц.

Условия эксперимента следующие. Угольный пласт мощностью 4,4 м залегал на глубине 590–600 м. Марка угля — ГЖ, крепость — от 80 до 90 у.е., определенная прочностномером П-1.

Как видно из рис. 1, спектр «шума» комбайна лежит в пределах 0–1200 Гц, и по мере удаления СМП от забоя выработки его высокочастотные составляющие затухают сильнее низкочастотных (реальная минимальная

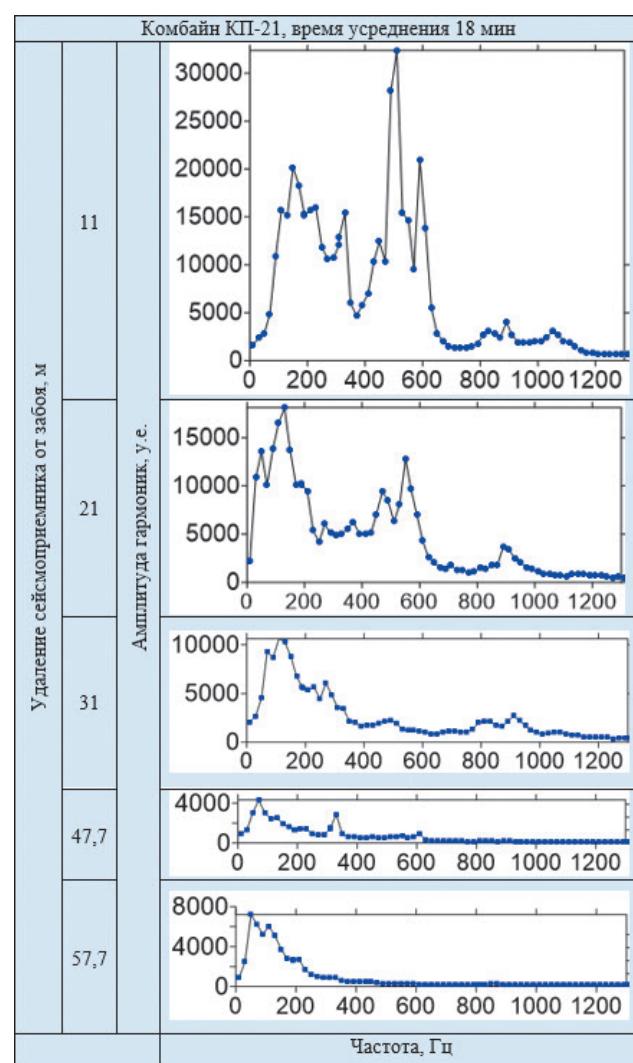


Рис. 1. Линейчатые спектры «шума» комбайна КП-21

частота СМП близка к 10 Гц). Другая особенность зависимости спектра от расстояния заключается в том, что амплитуда низкочастотных составляющих, зарегистрированных удаленным от забоя на 21 м СМП, больше амплитуд гармоник на этих же частотах, зарегистрированных ближайшим к источнику сигнала СМП. Результат таков, что на этих частотах на данном промежутке между излучателем и приемником сигнал как бы не затухает, а, наоборот, возрастает, что противоречит физической сущности затухания. Для объяснения в том числе и данного эффекта и предназначена настоящая работа. Третья особенность спектра состоит в том, что локальный максимум амплитуды спектра в диапазоне

частот 500–600 Гц по мере удаления СМП от источника исчезает.

На рис. 2 приведены спектры сигналов, зарегистрированные на другой шахте также аппаратно-программным комплексом «Микон-ГЕО» с пятью СМП, но удаленными от забоя выработки несколько дальше, чем показанные на рис. 1. Глубина ведения горных работ от поверхности составляла 490 м. Прочность угля на забое выработки — 90 у.е. Источником акустических сигналов здесь является другой тип комбайна — Joy 12 CV30. Область частот «шума» этого источника лежит в пределах 0–1400 Гц. Для этого эксперимента характерно меньшее по сравнению с предыдущим затухание гармоник в области частот 400–600 Гц по мере удаления СМП от источника. Отмечается возрастание амплитуд гармоник при прохождении участка между СМП, расположенными на расстоянии 49 и 59 м от источника, что также противоречит физическому смыслу затухания сигнала.

Таким образом, основываясь на результатах двух экспериментов, определяем для членного моделирования полосу рабочих частот 0–1400 Гц. На основании обработки экспериментальных данных, показанных на рис. 1, в работе [14] установлено, что для исключения возможности получения отрицательного значения коэффициента затухания сигнала следует определять гармоники в более широком частотном окне, чем 20 Гц, путем суммирования амплитуд гармоник в этом окне. Таковым окном по результатам эксперимента была обоснована ширина частотного окна в 200 Гц. Следовательно, спектр частот в области 0–1400 Гц можно представить линейчатым спектром из следующих 7 гармоник с частотами, полученными в результате суммирования амплитуд гармоник в своих окнах (в скобочках указана средняя частота окна): 0–200 (100); 220–400 (300); 420–600 (500); 620–800 (700); 820–1000 (900); 1020–1200 (1100); (1220–1400 (1300) Гц.

В работе [14] путем обработки данных, представленных на рис. 1, для диапазона частот 0–600 Гц и $f_0 = 1$ Гц, определены значения параметров, входящих в выражение (1):

$\alpha_0=0,0038 \text{ м}^{-1}$ и $\beta=0,0002 \cdot (\sigma_m/\sigma_{np})_3$, где $(\sigma_m/\sigma_{np})_3$ — отношение текущих и предельных средних напряжений при выполнении эксперимента. Эксперимент был выполнен на неопасном участке пласта. Поэтому предположим, что $(\sigma_m/\sigma_{np})_3 = 0,5$. Тогда параметр $\beta=0,0001 \text{ м}^{-1}$. Возьмем эти значения для моделирования продольной волны.

Для поперечной волны возьмем значения этих параметров уменьшенными на 20 %, поскольку известно, что затухание поперечной волны несколько меньше, чем продольной [15]. Тогда коэффициенты затухания для продольной α_p и поперечной α_s волн будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p &= 0,0038 + 0,0001 \cdot f_i \cdot \left(\frac{\sigma_{np}}{\sigma_m} \right), \\ \alpha_s &= 0,8\alpha_p, \end{aligned} \right\} \text{при условии } f_0=1 \text{ Гц.} \quad (4)$$

В описанных экспериментах спектр сигнала у источника не регистрировался. Однако из рис. 1 и рис. 2 видно, что на удалении СМП от забоя выработки примерно на 10 м максимальная амплитуда зарегистрирована на частоте, близкой к 500 Гц, и снижается в обе стороны от этой частоты. Для простоты расчетов примем, что это снижение в обе стороны происходит на одинаковую величину в 10% от амплитуды предыдущей гармоники. Амплитуды будем измерять в условных единицах. Предположим также, что амплитуды продольной и поперечной волн у источника излучения на соответствующих частотах равны между собой. Сказанное отображено в таблице, а амплитуда суммы продольной и поперечной волн у источника показана на рис. 3.

Показатель расхождения волн сильно зависит от структуры углепородного массива, расстояния от источника и частоты гармоники [14, 15]. Будем считать, что он определяется следующей функцией $R(r) = 1/\sqrt{r}$, как это по результатам экспериментальных исследований принято в работах [11, 16].

При сделанных допущениях формулу (3) можно преобразовать как сумму продольных и поперечных волн следующим образом:

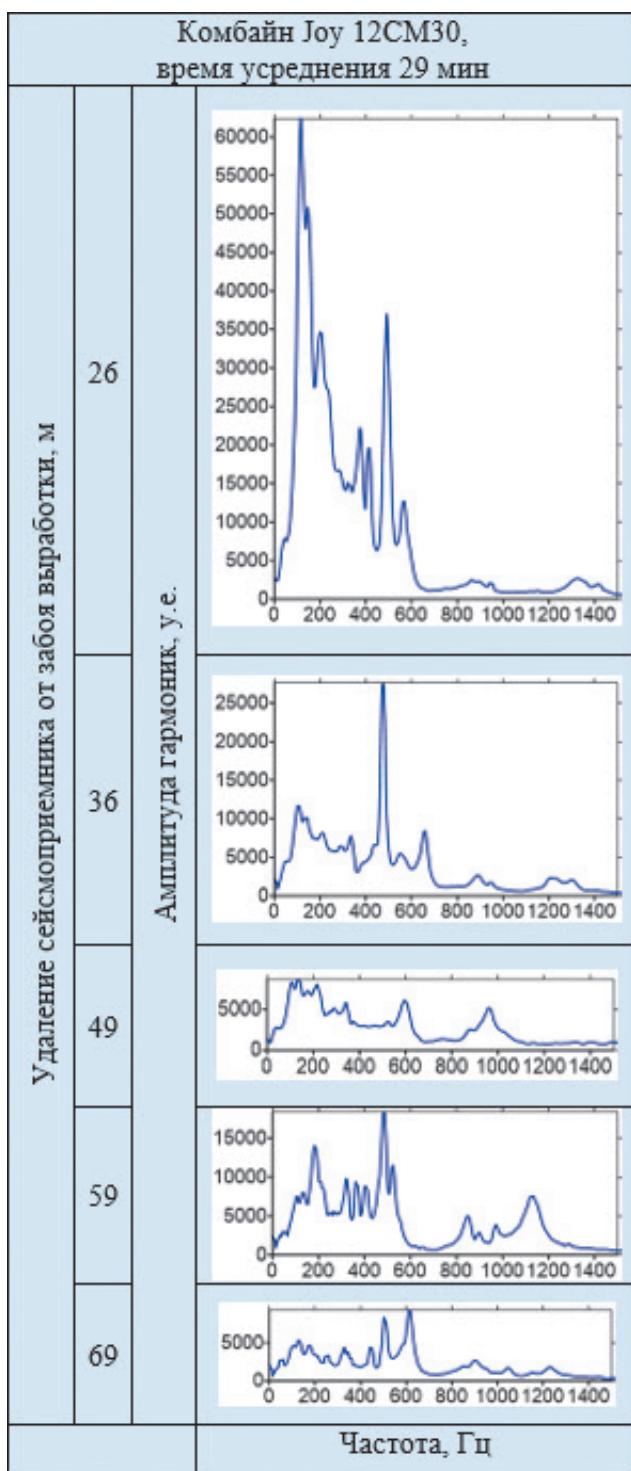


Рис. 2. Линейчатые спектры «шума» комбайна Joy 12CM30

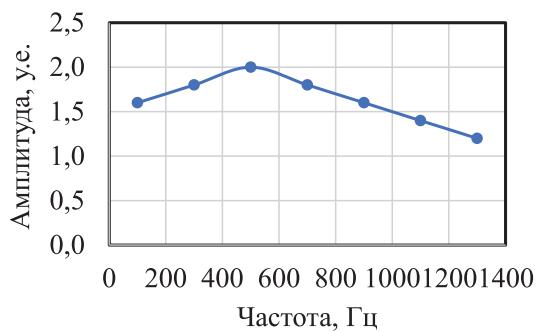


Рис. 3. Исходный линейчатый спектр «шума» комбайна у источника ($r=0$)

$$A(f, r) = R(r) \sum_{i=1}^7 a_{0i} \left(e^{-\alpha_p r} + e^{-\alpha_s r} \right). \quad (5)$$

Величину каждой i -й гармоники, входящей в (5), у источника излучения можно представить как функцию времени в следующем виде [17, 18]:

$$a_{0i} = A_{0i} \cos(2\pi f_i t + \varphi_{0i}) \quad (6)$$

где A_{0i} — амплитуда гармоники у источника, у.е.; f_i — частота i -й гармоники, Гц; φ_{0i} — начальная фаза, рад, которую для простоты анализа примем равной $\varphi_{0i}=0$.

Для перехода от временной зависимости амплитуды гармоник к пространственной введем замену:

$$t = r / v, \quad (7)$$

где v — скорость распространения волны. Значения скорости для продольной и поперечной волны возьмем из областей значений, указанных в [11], равными соответственно 3000 и 1800 м/с.

При указанных условиях величины каждой пары гармоник продольной и поперечной волн на соответствующей частоте f_i можно записать в виде:

Таблица

Значения амплитуд гармоник продольных и поперечных волн исходного спектра у источника

Номер гармоники i	1	2	3	4	5	6	7
f_i , Гц	100	300	500	700	900	1100	1300
A_{0i} , у.е.	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

$$\begin{aligned} a_{pi} &= A_{0i}(f_i) \cos(2\pi f_i r / 3000)(1/\sqrt{r}) \cdot \exp - \left\{ \left[0,0038 + 0,0001 f_i \cdot (\sigma_{np} / \sigma_m) \right] r \right\}, \\ a_{si} &= A_{0i}(f_i) \cos(2\pi f_i r / 1800)(1/\sqrt{r}) \cdot \exp - 0,8 \left\{ \left[0,0038 + 0,0001 f_i \cdot (\sigma_{np} / \sigma_m) \right] r \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда изменение во времени результирующей в результате интерференции каждой пары гармоник продольной и поперечной волн на соответствующей частоте A_{psi} записывается в виде:

$$a_{psi} = a_{pi} + a_{si}. \quad (9)$$

В качестве примера на рис. 4 показано изменение величины третьей гармоники

спектра продольной A_{p3} , поперечной A_{s3} волны и их суммы A_{ps3} с расстоянием r , рассчитанных в соответствии с (8) и (9).

Из рисунка видно, что благодаря различной скорости распространения продольной и поперечной волн на некоторых удалениях от источника они находятся в фазе и поэтому суммируются, а на других удалениях — в противофазе и поэтому вычитаются. В результате

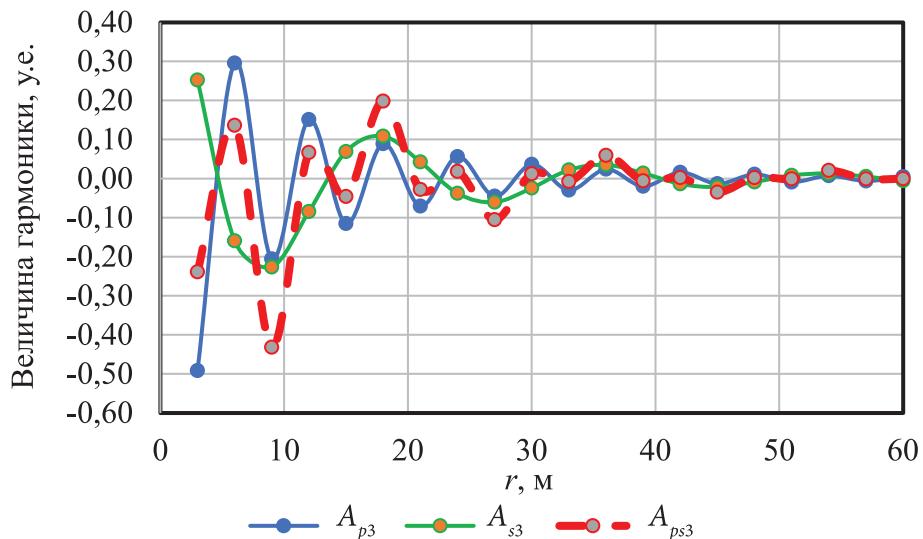


Рис. 4. Изменение величины третьей гармоники спектра продольной A_{p3} , поперечной A_{s3} волны и их суммы A_{ps3} с расстоянием r

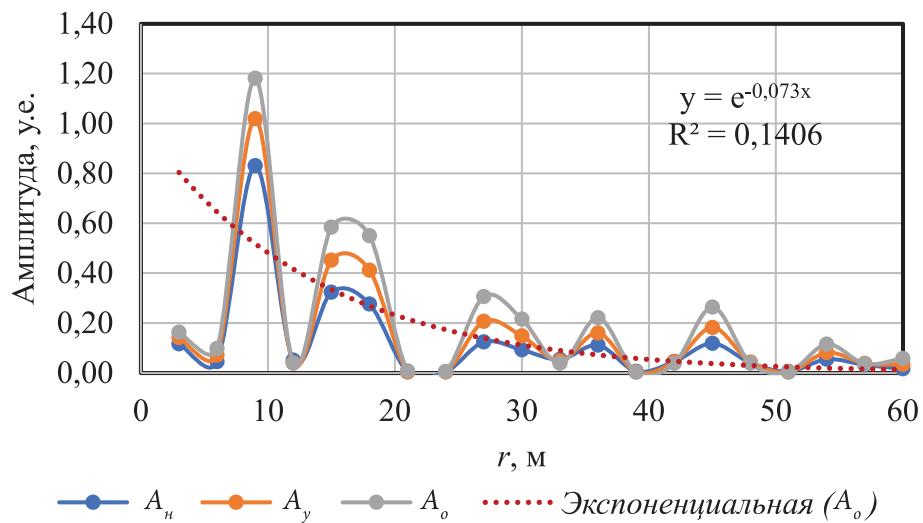


Рис. 5. Амплитуда результирующей каналовой волны на расстоянии r от источника при неопасном (A_h), угрожающем (A_y) и опасном (A_o) соотношении текущих и предельных напряжений.

такой интерференции амплитуда результирующего сигнала немонотонно изменяется с расстоянием между источником и СМП.

Зависимость от времени результирующей благодаря интерференции всех пар гармоник волны запишется в виде:

$$a_{\Sigma} = \sum_{i=1}^7 a_{psi}. \quad (10)$$

Амплитуды спектральных составляющих сигнала, выраженного формулой (10), определяются как модуль этой функции:

$$A_{\Sigma} = \left| \sum_{i=1}^7 a_{psi} \right|. \quad (11)$$

Исследуем зависимость всего спектра «шума» комбайна, выраженного формулами (8)–(11), для трех условий напряженного состояния призабойного пространства пласта:

- $(\sigma_{np}/\sigma_m) = 2,0$ – неопасное состояние;
- $(\sigma_{np}/\sigma_m) = 1,4$ – угрожаемое состояние;
- $(\sigma_{np}/\sigma_m) = 1,0$ – опасное состояние.

На рис. 5 показана зависимость амплитуды результирующей каналовой волны от расстояния r между источником и СМП при неопасном (A_n), угрожающем (A_y) и опасном (A_o) соотношении текущих и предельных напряжений. Поскольку в условиях численного моделирования этой волны заложено равенство амплитуд гармоник продольной и поперечной волн у источника и равенство нулю начальных фаз колебаний, амплитуда результирующей волны для некоторых значений r даже равна нулю. По этой же причине линия тренда зависимости $A_0(r) = \exp(-0,073r)$ хотя и подчиняется экспоненциальной зависимости, но величина достоверности этой аппроксимации очень маленькая $R^2 = -0,1406$. Реальный сигнал такими упрощениями не обладает. Поэтому колебательный характер изменения амплитуды волны с расстоянием, по-видимому, менее выражен.

Таким образом, приведенный пример численного моделирования подтвердил предположение о том, что интерференция продольных и поперечных колебаний в угольном пласте вполне может явиться одной из основных причин немонотонного убывания

амплитуды каналовой волны в угольном пласте, излучаемой рабочим органом работающего горного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Немонотонный характер убывания амплитуды акустической волны по мере удаления от источника зависит от многих причин, таких как структура массива, импульсный или непрерывный источник колебаний, регистрируется только продольная или только поперечная волна или их комбинация, или поверхностные волны. Поэтому могут существовать несколько подходов к объяснению этой немонотонности.

При импульсном источнике на достаточно большом удалении от него продольные и поперечные волны легко различаются благодаря различной скорости распространения. При непрерывном источнике на расстоянии в несколько десятков метров от него, как это имеет место при регистрации «шума» комбайна для прогноза ГДЯ, разделить эти два типа колебаний невозможно. В результате их интерференции нарушается экспоненциальный закон затухания каналовой волны с расстоянием, что приводит к снижению достоверности прогноза методами, основанными на спектральном анализе «шума» работающего горного оборудования.

Поиск путей устранения немонотонности убывания амплитуды акустической каналовой волны с расстоянием является задачей будущих исследований при совершенствовании геофизических методов прогноза ГДЯ, основанных на спектральном анализе этой волны.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0013 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений. 2024–2025 гг.» (рег. № 124041100072-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.
2. Руководство по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21.08.2017 г. № 327. 89 с.
3. Шадрин А.В., Плаксин М.С., Застрелов Д.Ю., Лузянин Д.Г. Методика анализа достоверности геофизических методов прогноза динамических явлений, выполненных переносными приборами // Горная промышленность. 2023. № S2. С. 11–17.
4. Копылов К.Н., Смирнов О.В., Кулик А.И., Пальцев А.И. Автоматизированная система контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 8. С. 32–37.
5. Шилов В.И., Горбачев А.С. Аппаратно-программное обеспечение акустических зондирований // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 3. С. 20–25.
6. Шадрин А.В. Сущность методов прогноза выбросоопасности угля, основанных на спектральном анализе «шума» работающего оборудования // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2024. № 1. С. 5–17.
7. Горбачев А.С., Шилов В.И., Шилов Д.А. Параметры искусственного акустического сигнала в слоистом массиве // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2025. № 2. С. 13–26.
8. Шадрин А.В., Шнайдер И.В. Экспериментальное определение коэффициента затухания спектральных составляющих «шума» работающего проходческого комбайна // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. М.: ИПКОН РАН. 2024. С. 217–220.
9. Зацепин А.Ф. Введение в физику акустического контроля: конспект лекций. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГГУ-УПИ, 2005. 88 с.
10. Аксенова О.Т. Промышленная акустика: учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2011. 132 с.
11. Азаров Н.Я., Яковлев Д.В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. М.: Недра, 1999. 199 с.
12. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизический контроль в угольных шахтах. Киев: «Наук. думка», 1978. 224 с.
13. Аверко Е.М., Булычов А.А. Осцилляция амплитуды сейсмической волны при ее распространении в однородной изотропной среде // Геофизические исследования. Методика и аппаратура: Сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. Отделение, Институт геологии и геофизики. Новосибирск, 1988. С.32–44.
14. Шадрин А.В. Измерение коэффициента затухания акустического излучения от работающего проходческого комбайна в угольной шахте // Горные науки и технологии. (В печати).
15. Зацепин А. Ф. Акустический контроль. В 2 ч. Ч 1. Введение в физику акустического контроля. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГГУ-УПИ, 2005. 88 с.
16. Аверин А.П. Методика определения свойств и состояния горных пород на основе затухания ультразвуковых волн: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2005. 18 с.
17. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». М.: Высш. шк., 1988. 448 с.
18. Романов В.В., Мальский К.С., Посеренин А.И., Дронов А.Н. Определение затухания сейсмических волн в приповерхностной толще горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 1. С. 110–116.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.37.65.001

UDC 622.831.322

© A. V. Shadrin, 2025

A. V. SHADRIN

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Institute of Coal «The FRC of Coal and Coal Chemistry of SB of RAS», Kemerovo

e-mail: avsh-357@mail.ru

ON THE NONMONOTONIC NATURE OF ACOUSTIC RADIATION ATTENUATION IN A CARBONIFEROUS MASSIF

Methods of forecasting geogasodynamic phenomena in coal mines based on spectral analysis of acoustic radiation generated into the array by a functioning working body of mining equipment are considered. The prediction by these methods is possible due to the directly proportional dependence of the sound attenuation coefficient in a solid on the frequency and the inversely proportional dependence on the rock pressure. It is assumed that the amplitude of the signal decreases exponentially with increasing distance from the sound emitter to the seismic receiver. However, experiments have shown that the decrease in amplitude with distance does not occur monotonously. It is assumed that this is due to the interference of different types of waves generated by the source and having different propagation speeds. The results of numerical simulation of the longitudinal and transverse vibrations interference on the amplitude of the resulting acoustic wave attenuation in a coal and rock array as it moves away from the source are presented. According to the conditions of the problem, the sound source is represented by linear spectra of seven pairs of longitudinal and transverse waves, each of which has the same frequency and initial amplitude, and zero initial phase. The harmonic frequencies, each of which is the sum of the harmonics of the original spectrum in a window with a width of 200 Hz, have the frequencies of the middle of the window, respectively 100, 300, 500, 700, 900, 1100 and 1300 Hz. As a result of the simulation, it was found that due to the different speeds of longitudinal and transverse waves at some distances from the source, these oscillations come in phase, as a result, the amplitude of the oscillations is summed up, and at other distances the oscillations come in antiphase and the resulting amplitude is the result of the difference in the amplitudes of the interfering waves. The numerical experiment confirmed the correctness of the assumption about the interference of wave types as a possible reason for the non-monotonic decrease in the amplitude of the "noise" of the mining combine with distance from it.

Keywords: COAL AND ROCK MASSIF, CURRENT FORECAST OF GEODYNAMIC PHENOMENA, ACOUSTIC RADIATION, WAVE INTERFERENCE, ATTENUATION COEFFICIENT.

REFERENCES

1. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Instructions for forecasting dynamic phenomena and monitoring rock formations during mining of coal deposits." Moscow: CJSC NTC PB, 2021. Ser. 05. Issue 49. 128 p. [In Russ.].
2. Safety Guide «Recommendations for the safe conduct of mining operations in dynamic coal seams». Approved by the Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 08/21/2017 No. 327. 89 p. [In Russ.].
3. Shadrin A.V., Plaksin M.S., Strellov D.Yu., Luzyanin D.G. Methodology for analyzing the reliability of geophysical methods for predicting dynamic phenomena performed by portable devices // Mining Industry. 2023. No. S2. P. 11–17. [In Russ.].

4. Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I., Fingers A.I. An automated system for monitoring the condition of a rock mass and forecasting dynamic phenomena // Occupational safety in industry. 2015. No. 8. P. 32–37. [In Russ.].
5. Shilov V.I., Gorbachev A.S. Hardware and software for acoustic sensing // Occupational safety in industry. 2022. No. 3. P. 20–25. [In Russ.].
6. Shadrin A.V. The essence of coal emission prediction methods based on spectral analysis of the «noise» of operating equipment // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety. 2024. No. 1. P. 5–17. [In Russ.].
7. Gorbachev A.S., Shilov V.I., Shilov D.A. Parameters of an artificial acoustic signal in a layered array // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety. 2025. No. 2. P. 13–26. [In Russ.].
8. Shadrin A.V., Schneider I.V. Experimental determination of the attenuation coefficient of the spectral components of the «noise» of a working tunneling combine // Problems and prospects of integrated development and conservation of the Earth's interior. Moscow: IPCON RAS. 2024. P. 217–220. [In Russ.].
9. Zatsepin A.F. Introduction to the physics of acoustic control: lecture notes. Yekaterinburg: State Educational Institution of Higher Professional Education UGTU-UPI, 2005. 88 p. [In Russ.].
10. Aksanova O.T. Industrial acoustics: a textbook. Blagoveshchensk: Amur State University, 2011. 132 p. [In Russ.].
11. Azarov N.Ya., Yakovlev D.V. Seismoacoustic method of forecasting mining and geological conditions of coal deposits. Moscow: Nedra, 1999. 199 p. [In Russ.].
12. Glushko V.T., Yamshchikov V.S., Yalansky A.A. Geophysical control in coal mines. Kiev: Naukova Dumka, 1978. 224 p. [In Russ.].
13. Averko E.M., Bulychov A.A. Oscillation of the amplitude of a seismic wave during its propagation in a homogeneous isotropic medium // Geophysical Research. Methodology and equipment: Collection of scientific papers / USSR Academy of Sciences, Sib. Department, Institute of Geology and Geophysics. Novosibirsk, 1988. P.32–44. [In Russ.].
14. Shadrin A.V. Measurement of the attenuation coefficient of acoustic radiation from a working tunneling combine in a coal mine // Mining Sciences and Technologies. (In print). [In Russ.].
15. Zatsepin A. F. Acoustic control. At 2 a.m. 1 a.m. An introduction to the physics of acoustic control. Yekaterinburg: State Educational Institution of Higher Professional Education UGTU-UPI, 2005. 88 p. [In Russ.].
16. Averin A.P. Methodology for determining the properties and condition of rocks based on attenuation of ultrasonic waves: abstract of the dissertation. ... Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2005. 18 p. [In Russ.].
17. Baskakov S.I. Radio engineering circuits and signals: Textbook for universities on spec. «Radio engineering». Moscow: Higher School, 1988. 448 p. [In Russ.].
18. Romanov V.V., Malskiy K.S., Poserenin A.I., Dronov A.N. Determination of attenuation of seismic waves in the near-surface thickness of mine workings // Mining information and Analytical Bulletin. 2018. No. 1. P. 110–116. [In Russ.].