

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖСЛОЕВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПОСАДКЕ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

З.В. Аксенов

ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: aksenov.zakhar@yandex.ru

Аннотация: Статья посвящена изучению параметров искусственных акустических сигналов, возникающих в зонах посадки кровли, а также определению их особенностей, позволяющих прогнозировать негативные динамические явления. Продемонстрированы результаты прогноза посадки кровли на основе аналитических расчетов при использовании данных о строении и прочностных характеристиках пород, залегающих над угольными пластами «Поленовский» и «Болдыревский» шахты «Им. С.М. Кирова», а также пласта «52» шахты «Им. В.Д. Ялевского». Проведенные исследования были направлены на обработку и анализ сведений автоматизированной системы акустического контроля состояния массива и прогноза негативных динамических явлений (САКСМ) в целях установления контроля за напряженно-деформированным состоянием массива горных пород. Оценка динамики ослабленных межслоевых контактов и состояния призабойной части массива горных работ осуществлялась по параметрам спектра искусственного акустического сигнала. Представлены особенности формирования искусственного акустического сигнала в слоистой среде и описание влияния процесса движения очистного забоя на вариативность параметров сигнала. По результатам анализа и обработки полученных данных представлено детальное распределение относительных напряжений на участках посадки основной кровли в лавах вышеуказанных шахт.

Ключевые слова: искусственный акустический сигнал, безопасность ведения горных работ, САКСМ, ослабленные межслоевые контакты, динамика относительных напряжений, угольный пласт, напряженно-деформированное состояние массива, локальная разгрузка горных пород, зона квадрата обрушения.

Для цитирования: Аксенов З. В. Исследование межслоевых деформаций, возникающих при посадке основной кровли угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 23–35. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_23.

Interlaminar deformations during top coal caving

Z.V. Aksenov

Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: aksenov.zakhar@yandex.ru

Abstract: This study focuses on determination and analysis of the parameters and features of manmade acoustic signals in top coal caving with a view to predicting hazardous dynamic events. The prediction results of top coal caving based on the analytical calculations using the data on the structure and strength characteristics of rocks above coal seams Polenovsky and

Boldyrevsky in Kirov mine and seam 52 in Yalovsky mine are presented. The research aim was processing and analysis of information provided by the automation system of acoustic rock mass control (SARMC) and the hazardous dynamic event prediction for the purpose of stress-strain monitoring of rock mass. Dynamics of weakened interfaces of layers and the face rock mass condition were assessed using the manmade acoustic signal parameters. The features of the manmade acoustic signals in the layered medium are described, and the influence of the face advance on variability of the signal parameters is discussed. Using the analysis and interpretation data, the detailed patterns of relative stresses in longwall sites of the above-listed mines during top coal caving are obtained.

Key words: manmade acoustic signal, mining safety, SARMC, weakened interfaces, relative stress dynamics, coal seam, rock mass stress-strain behavior, local rock relaxation, caving square zone.

For citation: Aksekov Z. V. Interlaminar deformations during top coal caving. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(9):23-35. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_23.

Введение

Контроль посадки основной кровли в процессе выемки угольного пласта на добычных участках является одной из задач мониторинга массива горных пород, реализуемого в целях обеспечения максимальных стандартов безопасности ведения горных работ.

Одной из причин значительного количества произошедших аварий и инцидентов на горнодобывающих предприятиях является внезапное обрушение пород кровли в зонах ее посадки. За период с 1919 по 2015 гг. на выемочных участках шахт Российской Федерации зафиксированы и расследованы 246 случаев обрушения пород кровли, что составляет 62% от их общего числа, причинами которых в 52,8% случаев являются нарушения технологии ведения горных работ [1].

Прогноз посадки кровли осуществляется преимущественно посредством аналитических расчетов при использовании данных о строении и прочностных характеристиках пород, залегающих над угольным пластом [2]. Однако неоднородность геологического строения пород кровли и изменчивость их физических

свойств не всегда позволяют с необходимой точностью определять параметры посадки пород кровли.

Реализация одного из методов прогноза посадки кровли основывается на регистрации и обработке искусственных акустических сигналов (далее — ИАС), которые возникают вследствие воздействия горного оборудования на очистной забой [3]. Сегодня вопросами акустического контроля за состоянием массива горных пород в процессе добычи полезных ископаемых посвящены работы как отечественных, так и зарубежных ученых.

Оценка динамики ослабленных межслоевых контактов и состояния массива горных пород

Среди особенностей формирования ИАС в слоистой среде выделяется возникновение в каждом слое, ограниченном ослабленными межслоевыми контактами (далее по тексту — ОМК), собственных колебаний, которые в спектре акустического сигнала выражаются в увеличении амплитуд на определенных резонансных частотах [4]. Определена функциональная зависимость между ча-

стотой собственных колебаний и мощностью слоя, расположенного между ослабленными контактами. Текущая зависимость имеет следующий вид:

$$f_p = \frac{v}{h}, \quad (1)$$

где v — скорость поперечных волн, для большинства осадочных пород около 2500 м/с; h — мощность слоя горных пород, ограниченного ОМК.

Таким образом, между расстоянием до ослабленного контакта и резонансной частотой колебаний существует обратно пропорциональная линейная зависимость [5].

Результаты исследований амплитуды резонансных частот демонстрируют преобладающую зависимость от степени ослабления контакта: более ослабленному контакту соответствует большая амплитуда резонансной частоты (добротность собственных колебаний) [6]. Данная зависимость позволяет на основе величины амплитуды резонансных колебаний делать вывод о степени ослабления контакта. Частота спектрального максимума F соответствует положению контакта с максимальным ослаблением.

Таким образом, определяя частоту резонансных колебаний и их амплитуду в промежутках времени или при смещении пунктов регистрации акустического сигнала, можно оценить динамику ОМК и состояния массива горных пород [7].

В условиях естественного залегания горных пород ослабленными межслоевыми контактами являются контакты между литологическими разностями при перерывах в осадконакоплении, включение прослоев углистого материала, возникновение микротрещин вдоль контакта. Формирование ОМК в процессе выемки угля происходит за счет развития межслоевых деформаций при про-

гибании толщи подрабатываемых пород, возникновении тангенциальных напряжений в средней ее части [8]. Связь между изменением межслоевых деформаций и динамикой спектра акустических сигналов продемонстрирована при проведении исследований призабойной части угольного массива в процессе выемки угля в очистном забое [9]. Непосредственно после снятия полосы угольного пласта комбайном межслоевые деформации вследствие кратковременного зависания пород кровли активизируются на удаленных контактах, далее, по мере прогибания толщи пород, межслоевые деформации развиваются по всей ее мощности и смещаются к своему устойчивому положению.

Оценка динамики относительных напряжений K (здесь и далее — доли ед.) осуществляется по величине отношения высокочастотной A_B и низкочастотной A_H составляющих спектра ИАС [10]:

$$K = \frac{A_B}{A_H} \quad (2)$$

Повышение величины этого коэффициента свидетельствует об увеличении напряжений в призабойной части массива горных пород [11].

Таким образом, параметры спектра ИАС позволяют оценивать динамику ОМК (межслоевых деформаций) и относительных напряжений в призабойном массиве [12].

Контроль за напряженно-деформированным состоянием массива горных пород реализуется в автоматизированной системе акустического контроля состояния массива и прогноза динамических явлений (САКСМ) [13]. Данная система включает в себя программно-аппаратный комплекс регистрации и трансфера акустических сигналов, предназначенного для дальнейшей обработки и анализа по соответствующей программе.

Исследование принципов распределения относительных напряжений на участках посадки основной кровли в лавах угольных пластов

Исследования межслоевых деформаций и относительных напряжений основывались на результатах работы САКСМ в двух лавах угольного пласта «Болдыревский» (24–58 и 24–59), в лаве 25–96 пласта «Поленовский» шахты «Им. С.М. Кирова» и в лаве 52–12 шахты «Им. В.Д. Ялевского» АО «СУЭК-Кузбасс».

Мощность угольного пласта «Болдыревский» изменяется от 2,05 до 2,9 м, его непосредственная кровля с преобладанием состоит из алевролитов, песчаников и аргиллитов, прочность которых варьируется в диапазоне 50–60 мПа. Основная кровля сложена песчаниками мощностью до 20 м. Почва пласта представлена алевролитами и аргиллитами, имеющими склонность к пучению. Глубина ведения горных пород по пласту «Болдыревский» составляет 430–545 м.

Угольный пласт «Поленовский» залегает на 45–48 м ниже защитного пласта «Болдыревский». Мощность пласта изменяется в диапазоне 1,72–1,8 м. Непосредственная кровля пласта сложена аргиллитами и алевролитами, мощность которых варьируется от 1,5 до 8 м при средней прочности 30–40 мПа. Основная кровля представлена песчаником прочностью 80–100 мПа и мощностью 20 м. Непосредственная почва

пласта представлена аргиллитом прочностью 30–40 мПа.

Отработка угольного пласта «52» шахты «Им. В.Д. Ялевского», мощность которого составляет 4,0–4,7 м, осуществляется на глубине 440 м. Непосредственная кровля — мелкозернистый алевролит мощностью 3–17 м, коэффициент крепости которого составляет $f = 2 - 3$. Основная кровля состоит из переслаивания алевролита и песчаника мощностью до 25 м при коэффициенте крепости $f = 3 - 4$.

В процессе проведения эксперимента система САКСМ осуществляла работу в различных горно-геологических условиях:

- пласт «Болдыревский» — отработка одиночного угольного пласта, мощность которого составляет 2,3 м;
- пласт «Поленовский» — при наличии зон повышенного горного давления отработка защищенного надработкой угольного пласта, мощность которого составляет 1,7 м;
- пласта «52» — отработка одиночного угольного пласта, характеризующегося мощностью в 4 м.

Общие представления о распределении относительных напряжений K на участках посадки основной кровли по всем объектам исследований следуют из данных рис. 1, а именно: достаточно высокая степень изменения параметра с выраженными максимальными и минимальными значениями. Характерные признаки изменения относительных на-

Таблица 1

Значения K (доли ед.) и F (Гц) в зонах посадки пород кровли
Values of K (fractions) and F (Hz) in top coal caving zones

Лавы	Дата	$K_{\text{мин}}$	$K_{\text{макс}}$	$F_{\text{мин}} / \text{h, Гц/м}$	$F_{\text{макс}} / \text{h, Гц/м}$	$K_{\text{макс}} / K_{\text{мин}}$
24–58	02.11.2016	0,4	1,3	60/~40	320/7,8	3,25
24–59	20.02.2017	0,64	1,44	20/~120	80/~30	2,25
25–96	23.01.2017	0,65	1,2	60/~40	80/~30	1,85
52–12	25.01.2017	0,5	3,2	40/~60	100/25	4,6

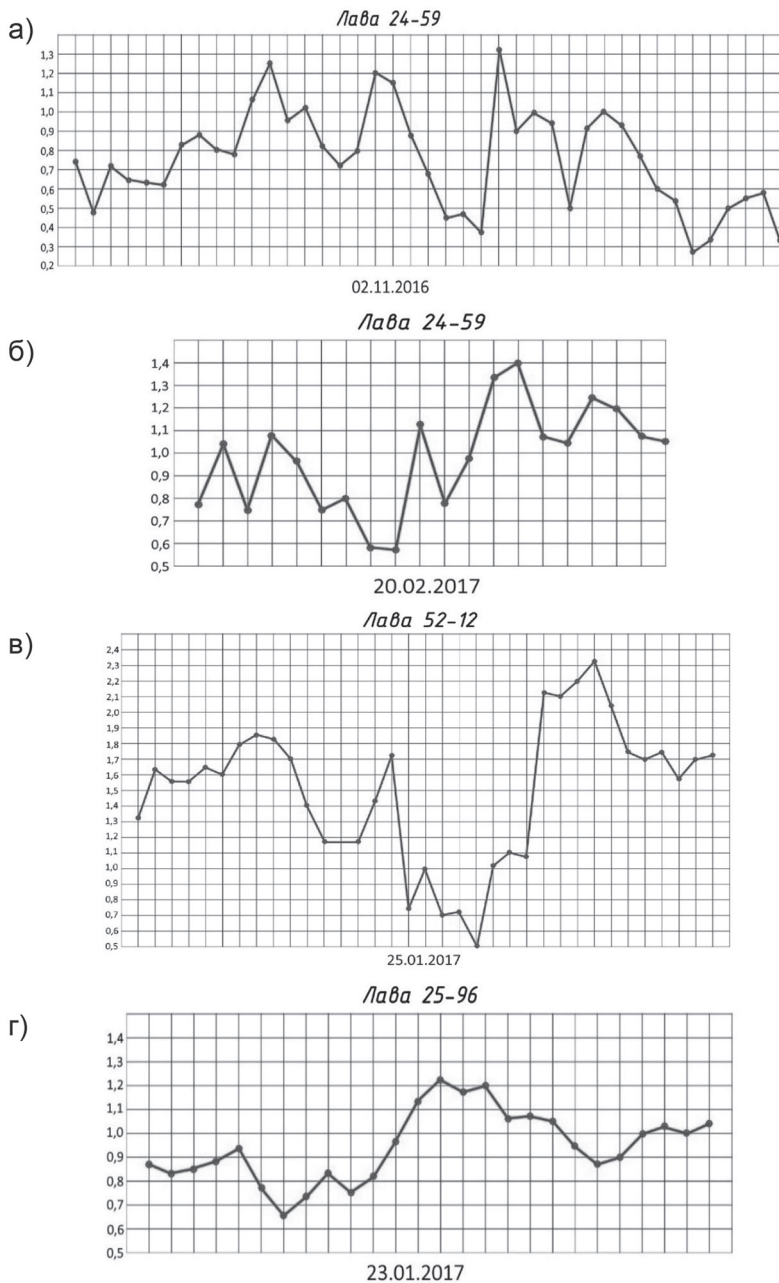


Рис. 1. Динамика коэффициента относительных напряжений K при посадке основной кровли угольного пласта в различных лавах: лава «24–58» пласта «Болдыревский» шахты «Им. С.М. Кирова» (а); лава «24–59» пласта «Болдыревский» шахты «Им. С.М. Кирова» (б); лава «52–12» шахты «Им. В.Д. Ялевского» (в); лава «25–96» пласта «Поленовский» шахты «Им. С.М. Кирова» (г)

Fig. 1. Dynamics of relative stress ratio K during top coal caving in different longwalls: longwall 24–58, coal seam Boldyrevsky, Kirov mine (a); longwall 24–59, coal seam Boldyrevsky, Kirov mine (b); longwall 52–12, Yalovsky mine (v); longwall 25–96, coal seam Polenovsky, Kirov mine (g)

пряжений: от фоновых значений K следует их уменьшение с последующим ростом вплоть до достижения глобального максимума (наивысшего значения K), после которого наблюдается спад значений, свидетельствующий о локальной разгрузке массива, обусловленной развитием трещиноватости и обрушением пород, которое подтверждают повышенные выделения метана вплоть до случаев загазирования.

В табл. 1 представлены минимальные и максимальные значения коэффициента относительных напряжений K (доли ед.) и спектрального максимума акустического сигнала F (Гц) в зонах посадки основной кровли на объектах рис. 1. В приведенных частных случаях отношение параметра K возрастает с увеличением мощности обрабатываемого лавой пласта, а изменение расстояний до контакта с максимальным ослаблением отмечено в обратном направлении.

Вышеуказанные параметры в значительной степени изменяются в процессе движения очистного забоя каждой из рассматриваемых лав. В качестве примера на рис. 2 представлены распреде-

ления коэффициента K , совмещенные по минимальным значениям, на участке первой посадки основной кровли в лаве 24–58 и при отходе очистного забоя на 120 м от монтажной камеры. При сохранении общих закономерностей изменения параметра K , резко отличаются его отношения в экстремумах: в зоне первой посадки 4,1 против 1,5 при регулярных посадках кровли в адаптированном состоянии массиве горных пород.

Более детальное распределение относительных напряжений на участках посадки основной кровли при подвигании очистного забоя на протяжении не менее 2-х месяцев представлено в табл. 2–4, которое позволяет оценивать динамику процесса посадки основной кровли.

В лавах 25–96 и 24–59 рассматривается отход от монтажной камеры на расстояние, превышающее длину очистного забоя (зона «квадрата» сдвижения и обрушения пород выше основной кровли, далее — квадрат обрушения пород). В лаве 52–12 — регулярная посадка основной кровли.

В лаве 25–96 (мощность пласта 1,7 м) выделяются первая посадка пород кров-

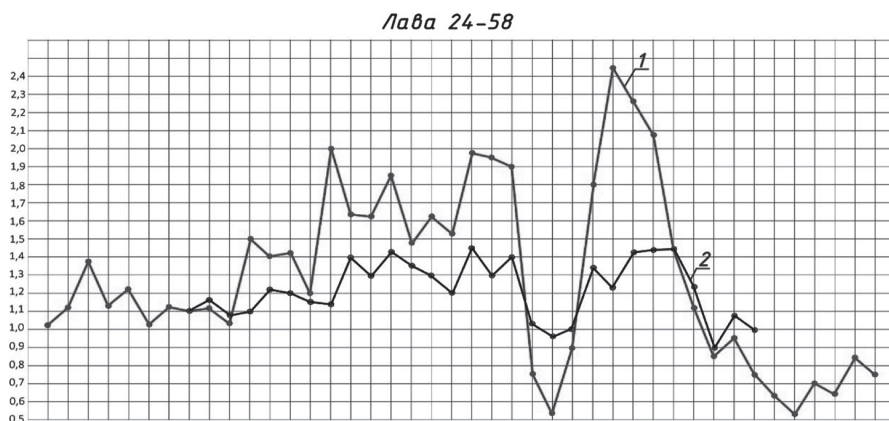


Рис. 2. Динамика коэффициента относительных напряжений, рассматриваемая в зоне первой посадки пород кровли (1) и на удалении 120 м от монтажной камеры (2) в лаве 24–58

Fig. 2. Dynamics of relative stress ratio in the initiation zone of top coal caving (1) and at a distance of 10 m from teardown room (2) in longwall 24–58

Таблица 2

Значения коэффициента относительных напряжений при посадке основной кровли в лаве 25–96 пласта «Поленовский» шахты «Им. С.М. Кирова»

Values of relative stress ratio in top coal caving in longwall 25–96 in coal seam Polenovsky in Kirov mine

Дата	Время	Выработка	Значения коэффициента K				Макс / мин
			фон	макс.	мин.	обрушение пород	
21.12.2016	09:24	вентиляционная печь ¹	0,9	1,32	0,85	1,05 – 1,1	1,55
21.12.2016	09:24	конвейерная печь ¹	0,8	2,1	0,6	0,7	3,5
06.01.2017	05:51	вентиляционная печь	0,98	1,04	0,97	0,98	1,07
10.01.2017	14:14	вентиляционная печь	1,00	1,06	0,98	0,98	1,08
19.01.2017	15:41	вентиляционная печь	0,95	1,04	0,93	0,98	1,12
20.01.2017	20:16	вентиляционная печь	1,00	1,03	0,97	0,97	1,06
21.01.2017	09:32	конвейерная печь	1,1	1,73	0,9	0,8	1,92
23.01.2017	20:02	конвейерная печь	0,85	1,2	0,65	1,0	1,85
25.01.2017	07:13	вентиляционная печь	1,06	1,12	1,04	1,1	1,08
25.01.2017	23:18	конвейерная печь	1,2	1,48	1,05	0,85	1,41
28.01.2017	13:26	конвейерная печь	0,95	1,52	0,78	0,96	1,95
02.02.2017	02:31	вентиляционная печь ²	1,18	1,3	1,06	1,12	1,23
02.02.2017	08:31	конвейерная печь ²	0,8	1,45	0,55	1,0	2,64
13.02.2017	01:37	конвейерная печь	0,7	1,67	0,8	0,8	2,01

¹ — при первой посадке пород кровли; ² — при посадке кровли в зоне квадрата обрушения пород.

ли (индекс 1 в названии выработки) и посадка пород кровли в зоне квадрата обрушения пород (индекс 2 в названии выработки). Отношение коэффициентов K в первом случае 1,55 и 3,5 в вентиляционной и конвейерной печах соответственно и во втором случае — 1,23 и 2,64. В промежутке между ними средние значения отношений коэффициентов в вентиляционной печи также существенно меньше (1,09), чем в конвейерной печи (1,78). Из практики ведения горных работ известно, что данные две посадки пород кровли угольного пласта представляют наибольшую опасность по динамическим явлениям.

В табл. 3 представлено распределение динамики относительных напряжений в лаве 24–59 (мощность пласта

2,0–2,3 м) на участке отхода от монтажной камеры и пересечения зоны квадрата обрушения пород. На первом участке отношение коэффициента K в вентиляционной и конвейерной печах в среднем — 2,42, в зоне квадрата обрушения пород максимальные значения отличаются существенно — 1,79 (вент.) и 3,1 (конв.). Это на 17–45% больше аналогичных значений в зоне квадрата обрушения пород и на 27% больше в целом средних значений в лаве 25–96.

В табл. 4 представлено распределение динамики отношений коэффициента K в указанных экстремумах при регулярной посадке основной кровли в лаве 52–12 (мощность пласта около 4,0 м). Здесь также существенно отличаются средние значения отношений по

Таблица 3

Значения коэффициента относительных напряжений при посадке основной кровли в лаве 24–59 пласта «Болдыревский» и шахты «Им. С.М. Кирова» от монтажной камеры до зоны квадрата обрушения пород

Values of relative stress ratio in top coal caving in longwall 24–59 in coal seam Boldyrevsky in Kirov mine versus distance from teardown room to caving square zone

Дата	Время	Выработка	Значения коэффициента К				Макс / мин
			фон	макс.	мин.	обрушение пород	
07.03.2017	11:45	вентиляционная печь	0,3	0,25	0,73	0,57	2,92
07.03.2017	12:23	конвейерная печь	0,72	0,47	0,93	0,33	2,32
09.03.2017	22:00	вентиляционная печь	0,7	0,57	1,44	0,72	2,53
09.03.2017	22:07	конвейерная печь	1,1	1,1	2,3	1,2	2,1
12.03.2017	10:29	вентиляционная печь	0,8	0,56	1,26	0,48	2,25
12.03.2017	02:27	конвейерная печь	1,3	1,05	1,52	0,6	1,45
18.03.2017	02:55	вентиляционная печь	0,9	0,76	1,22	0,84	1,6
17.03.2017	04:41	конвейерная печь	1,4	0,7	2,0	0,5	2,86
22.03.2017	10:01	вентиляционная печь	0,92	0,8	1,38	0,78	1,72
21.03.2017	17:50	конвейерная печь	0,85	0,8	1,15	0,67	1,43
23.03.2017	06:24	вентиляционная печь ²	1,0	0,8	1,43	0,63	1,79
29.03.2017	08:34	вентиляционная печь ²	0,63	0,47	0,76	0,52	1,62
25.03.2017	17:49	конвейерная печь ²	1,0	0,55	1,7	1,1	3,1
28.03.2017	13:21	конвейерная печь ²	1,1	0,7	1,68	0,8	2,4
07.04.2017	04:33	вентиляционная печь	1,0	0,84	1,4	0,8	1,67
07.04.2017	23:14	конвейерная печь	1,0	1,2	2,6	1,2	2,17
15.04.2017	15:51	вентиляционная печь	0,78	0,57	1,18	0,66	2,07
13.04.2017	20:47	конвейерная печь	1,28	0,96	1,78	0,96	1,85
18.04.2017	11:43	вентиляционная печь	0,72	0,63	1,49	0,54	2,36
19.04.2017	18:45	конвейерная печь	1,00	0,7	1,6	1,25	2,28

² – зона квадрата обрушения пород. Приведенные данные свидетельствуют о росте динамической активности посадки основной кровли по мере увеличения мощности угольного пласта.

вентиляционному штреку – 2,3 (интервал 1,04–4,6) против 4,2 (интервал 1,4–8,3) по конвейерному штреку. По сравнению с конвейерной печью лавы 25–96 увеличение в 2,6 раза, по сравнению с конвейерной печью лавы 24–59 увеличение в 2,1 раза.

Динамика ОМК прослежена по спектрам ИАС, полученным на различных участках посадки основной кровли.

В качестве примера на рис. 3 представлены спектры акустических сигналов, полученные в лаве 24–58 перед первой посадкой пород кровли в минимуме (а) и в максимуме (б) напряжений.

В минимуме напряжений (рис. 3, а) резонансные частоты сосредоточены в левой низкочастотной части спектра: 40, 100, 140, 240 Гц, которым соответствуют положения ослабленных контактов:

Таблица 4

Динамика коэффициента относительных напряжений, наблюдаемая при регулярной посадке основной кровли в лаве 52–12 шахты «Им. В.Д. Ялевского»
Dynamics of relative stress ratio in top coal caving in longwall 52–12 in Yalovsky mine

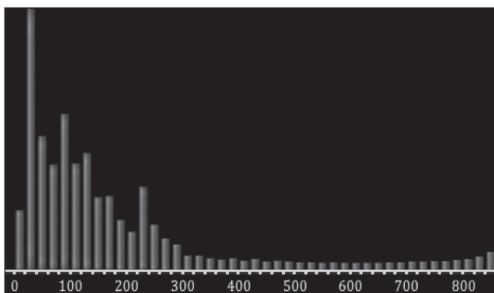
Дата	Время	Выработка	Значения коэффициента $K_{0,н}$				Макс / мин
			фон	макс.	мин.	обрушение пород	
08.01.2017	20:07	конвейерный штрек	0,6	0,46	3,65	1,2	7,9
16.01.2017	14:28	вентиляционный штрек	0,75	0,58	1,6	0,9	2,8
23.01.2017	12:45	конвейерный штрек	1,8	1,05	2,53	0,9	2,4
26.01.2017	02:05	вентиляционный штрек	1,5	0,5	2,32	1,7	4,6
28.01.2017	06:05	вентиляционный штрек	1,2	0,7	1,52	0,8	2,2
01.02.2017	18:30	вентиляционный штрек	0,9	0,48	1,6	0,9	1,8
08.02.2017	12:09	конвейерный штрек	0,45	0,3	2,5	1,6	8,3
08.02.2017	03:37	вентиляционный штрек	0,8	0,65	1,65	0,9	2,5
11.02.2017	09:38	вентиляционный штрек	0,8	0,52	1,4	0,6	2,7
17.02.2017	12:59	конвейерный штрек	0,95	0,95	1,36	0,95	1,4
03.03.2017	09:35	конвейерный штрек	0,6	0,42	1,28	0,9	3,2
03.03.2017	10:12	вентиляционный штрек	0,08	0,9	1,23	0,6	1,04
06.03.2017	03:13	конвейерный штрек	1,0	0,7	1,54	0,9	2,2
07.03.2017	04:17	вентиляционный штрек	0,9	0,6	1,72	1,3	2,9
11.03.2017	12:23	вентиляционный штрек	0,9	1,2	2,52	0,8	2,1
11.03.2017	16:29	конвейерный штрек	0,9	0,22	0,92	0,7	4,18

60, 25 (максимальные ослабления), 19 и 10 м. В максимуме напряжений (рис. 3, б) резонансные частоты смещены в сторону высоких частот: 160, 220 и 340 Гц, которым соответствуют положения ос-

лабленных контактов: 16, 11 (максимальные ослабления) и 8 м.

В табл. 5 представлены значения резонансных частот и соответствующие им межслоевые деформации, а также

а)



б)

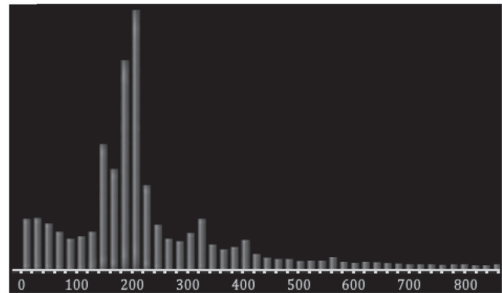


Рис. 3. Линейные спектры акустических сигналов в минимуме (а) и в максимуме (б), зарегистрированные в лаве 24–58

Fig. 3. Linear spectra of acoustic signals at minimum (a) and at maximum (b) in longwall 24–58

Таблица 5

Значения резонансных частот и положение ослабленных контактов при первой посадке основной кровли в лаве 24–58 пласта «Болдыревский» шахты «Им. С.М. Кирова»

Values of resonance frequencies and location of weakened interfaces in initial top coal caving in longwall 24–58 in coal seam Boldyrevsky in Kirov mine

№	Дата, время	Участки анализа спектра	Значения резонансных частот, Гц	Положение активных контактов в породах кровли, м
1	01.11.2016; 02:35	перед зоной посадки	60, 160 ¹ , 200, 240, 320	40; 15,6 ² ; 12,5; 10,4; 7,8
2	01.11.2016; 10:08	в минимуме напряжений	40 ¹ , 100, 140, 240	60 ² ; 25; 17,9; 10,4
3	02.11.2016; 17:20	в максимуме напряжений	160, 220 ¹ , 340	15,6; 11,4 ² ; 7,4
4	03.11.2016; 05:01	при обрушении пород	60, 160, 200 ¹ , 340, 400	40; 15,6; 12,5 ² ; 7,4; 6,2

¹ — частоты спектрального максимума; ² — контакты с максимальным расслоением пород.

ОМК в зоне первой посадки пород кровли в лаве 24–58.

Приведенные в табл. 5 резонансные частоты и соответствующие им локации ослабленных контактов следует рассматривать с точностью, соответствующей дискретности значений частот 20 Гц в рабочем линейном спектре акустических сигналов. Это приводит к отклонениям более 10% от реального положения контактов в низкочастотной области резонансов (до 140 Гц).

Перед зоной посадки пород кровли активные контакты пород расположены на существенном удалении от угольного пласта, деформации зафиксированы на расстоянии до 60 м. Существенное развитие межслоевых деформаций и процесс сдвижения пород начинаются со второго максимума (перед зоной посадки основной кровли), при этом появляется широкий спектр активных контактов — от 40 м до 7,8 м. В последующем минимуме напряжений резко возрастают деформации на удаленных контактах (до 60 м), происходит прогибание толщи пород и их сдвижение. В глобальном максимуме напряжений максимальные расслоения пород смещаются на расстояние 11,4 м от пласта, проис-

ходит «защемление» его краевой части. За глобальным максимумом следует активное расслоение массива горных пород, обрушение пород кровли, в отдельных случаях — сдвижение пород на существенном удалении от угольного пласта.

Учитывая, что угол сдвижения пород впереди движущегося забоя составляет около 70°, возникает предположение, что начало межслоевых деформаций определяется впереди забоя на расстоянии

$$l = 0,364 \times h \quad (3)$$

где h — расстояние до ослабленного контакта.

Из формулы (3) следует, что максимум опорного давления располагается за участком развития максимальных межслоевых деформаций (ОМК) для приведенного примера, в максимуме относительных напряжений — на расстоянии около 4 м, а в минимуме — на расстоянии более 23 м.

В подавляющем большинстве зона посадки пород кровли носит локальный характер как по длительности активных процессов развития межслоевых деформаций, так и по интенсивности их проявления, выражающихся в значениях K .

Длительность посадки пород кровли, как правило, составляет от 24 до 48 ч, активная фаза обрушения пород от 3–4 до 24 ч. Превышение коэффициента относительных напряжений в глобальном максимуме обычно не превышает 2, значения отношений K в экстремумах также чаще всего менее 2. Значения этого отношения существенно повышаются на участке первой посадки основной кровли и на участке вовлечения в обрушение пород, залегающих выше границы основной кровли, при отходе от монтажной камеры на расстояние, определяемое длиной очистного забоя и дальнейшим движением забоя на некоторое расстояние.

Динамичность процесса повышается по мере увеличения мощности угольного пласта.

Динамика межслоевых деформаций в зонах посадки пород кровли угольного пласта неизбежно отражается на изменении газовыделения в вентиляционной струе, исходящей из лавы [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костеренко В. Н., Воробьева О. В., Артемьев В. Б. и др. Обрушение горных выработок. — М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2015. — 528 с.
2. Мирер С. В., Хмара О. И., Масленщиков Е. В. О контроле выбросоопасности забоев по спектральным характеристикам акустических сигналов / Вопросы предотвращения внезапных выбросов. Научное сообщение ИГД им. А.А. Скочинского. — 1987. — С. 52–61.
3. Shkuratnik V. L., Kravchenko O. S., Filimonov Y. L. Acoustic emission of rock salt at different uniaxial strain rates and under temperature // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2020, vol. 61, no. 3, pp. 479–485.
4. Гликман А. Г. Поля упругих колебаний в горных породах. — Л.: ЛГИ, 1985. — 65 с. — Деп. в ВИНТИ, М., № 188 МГ-Д85.
5. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate // Strain. 2002, vol. 38, no. 4, pp. 157–159.
6. Гликман А. Г. Физика и практика спектральной сейсморазведки. — Geokniga, 2002. — 141 с.
7. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Ануфренкова П. С. Об особенностях ультразвуковых измерений в образцах угля с использованием поперечных упругих волн // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 4. — С. 117–126. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-117-126.
8. Николенко П. В., Набатов В. В. Об обеспечении помехозащищенности геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // Горный журнал. — 2015. — № 9. — С. 33–36. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.06.

Выводы

С учетом полученных результатов исследований искусственных акустических сигналов при использовании программно-аппаратного комплекса САКСМ определены принципы распределения и динамики ослабленных межслоевых контактов и относительных напряжений на различных участках посадки пород основной кровли.

Установлена зависимость интенсивности динамической активности посадки основной кровли по мере увеличения мощности угольного пласта.

Представлены особенности распределения относительных напряжений в лавах угольных шахт на участках отхода от монтажной камеры и пересечения зоны квадрата обрушения пород, что делает возможным на основе параметров искусственного акустического сигнала прогнозировать зону посадки пород кровли и оценивать степень опасности возникающих при этом динамических явлений.

9. Брюханов А. М., Агафонов А. В., Рубинский А. А., Колчин Г. И. Акустический контроль выбросоопасности / Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах. Т. 3. — Донецк: Вебер, 2007. — 692 с.

10. Alkana H., Cinarb Y., Pusch G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007, vol. 44, no. 1, pp. 108–119.

11. Worden K., Spencer A. B., Packo P., Staszewski W. J., Uhl T., Pierce S. G. Acoustic emission source characterisation using evolutionary optimization // *Strain*. 2018, vol. 54, no. 4. DOI: 10.1111/str.12272.

12. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining // *Eurasian Mining*. 2020, no. 1, pp. 9–13. DOI: 10.17580/em.2020.01.02.

13. 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.

14. Костеренко В. Н., Смирнов Р. О., Аксенов З. В. Динамика газовыделений в очистных забоях // *Горная промышленность*. — 2019. — № 2 (144). — С. 52–58. **МИАБ**

REFERENCES

1. Kosterenko V. N., Vorob'eva O. V., Artem'ev V. B. *Obrushenie gornyykh vyrabotok* [Caving of underground openings], Moscow, Izd-vo «Gornoe delo» OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2015, 528 p.

2. Mirer S. V., KHmara O. I., Maslenshchikov E. V. O kontrole vybrosoopasnosti zaboev po spektral'nym kharakteristikam akusticheskikh signalov. *Voprosy predotvrashcheniya vnezapnykh vybrosov. Nauchnoe soobshchenie IGD im. A.A. Skochinskogo* [Outburst hazard control in faces by spectrum characteristics of acoustic signals. Prevention of Outbursts. Skochinsky Institute of Mining Report], 1987, pp. 52–61. [In Russ].

3. Shkuratnik V. L., Kravchenko O. S., Filimonov Y. L. Acoustic emission of rock salt at different uniaxial strain rates and under temperature. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2020, vol. 61, no. 3, pp. 479–485.

4. Glikman A. G. *Polya uprugikh kolebaniy v gornyykh porodakh* [Fields of elastic vibrations in rocks], Leningrad, LGI, 1985, 65 p. Deposited manuscript, VINITI, no. 188 MG-D85. [In Russ].

5. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate. *Strain*. 2002, vol. 38, no. 4, pp. 157–159.

6. Glikman A. G. *Fizika i praktika spektral'noy seysmorazvedki* [Physics and practice of spectrum seismic], Geokniga, 2002, 141 p.

7. Skuratnik V. L., Nikolenko P. V., Anufrenkova P. S. About features of ultrasonic measurements in coal samples using shear elastic waves. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 117–126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-117-126.

8. Nikolenko P. V., Nabatov V. V. Interference protection in geoacoustic control of critical stresses in rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 9, pp. 33–36. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.06.

9. Bryukhanov A. M., Agafonov A. V., Rubinskiy A. A., Kolchin G. I. Akusticheskiy kontrol' vybrosoopasnosti. *Rassledovanie i predotvrashchenie avariyy na ugol'nykh shakhtakh* [Acoustic control of outburst hazard. Investigation and prevention of accidents in coal mines], vol. 3. Donetsk, Veber, 2007, 692 p.

10. Alkana H., Cinarb Y., Pusch G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007, vol. 44, no. 1, pp. 108–119.

11. Worden K., Spencer A. B., Packo P., Staszewski W. J., Uhl T., Pierce S. G. Acoustic emission source characterisation using evolutionary optimization. *Strain*. 2018, vol. 54, no. 4. DOI: 10.1111/str.12272.

12. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., Vysotin N. G. Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining. *Eurasian Mining*. 2020, no. 1, pp. 9–13. DOI: 10.17580/em.2020.01.02.

13. Kopylov K. N., Smirnov O. V., Kulik A. I., Pal'tsev A. I. Automation system of acoustic rock mass control (SARMC) and hazardous dynamic event prediction. *Occupational Safety in Industry*. 2015, no. 8, pp. 32 – 37. [In Russ].

14. Kosterenko V. N., Smirnov R. O., Aksekov Z. V. Gas emission dynamics in longwalls. *Russian Mining Industry*. 2019, no. 2 (144), pp. 52 – 58. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Аксенов Захар Владленович – аспирант,
ГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: aksenov.zakhar@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Z. V. Aksekov, Graduate Student, e-mail: aksenov.zakhar@yandex.ru,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS»,
119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 12.05.2021; получена после рецензии 23.06.2021; принята к печати 10.08.2021.
Received by the editors 12.05.2021; received after the review 23.06.2021; accepted for printing 10.08.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЗАКЛАДКИ ВЫРАБОТАННОГО ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИРОДОПОДОБНОГО ТИПА (2021, № 3, СБ 5, 20 с.)

Кускильдин Р.Б.¹, Васильева М.А.¹, Волчихина А.А.¹, Зеленцова А.А.¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Представлены результаты исследований, выполненных в рамках научной работы по созданию комплекса оборудования для проведения закладочных работ с применением природоподобного насосного оборудования. Мероприятия по проведению закладочных работ проводятся в целях повышения безопасности ведения горных работ, управления горным давлением, снижения возможных потерь полезного ископаемого при выемке, предотвращения возникновения подземных пожаров, а также внезапных выбросов угля и газа, охраны объектов на селитебных территориях.

RESEARCH IN FIELD OF CREATING A COMPLEX FOR LAYING DEVELOPED UNDERGROUND SPACE ON BASIS OF PUMPING EQUIPMENT OF A NATURE-LIKE TYPE

R.B. Kuskildin¹, M.A. Vasilyeva¹, A.A. Volchikhina¹, A.A. Zelentsova¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

The results of research carried out within the framework of scientific work on the creation of a complex of equipment for laying works using nature-like pumping equipment are presented. Measures for carrying out laying works are carried out in order to improve the safety of mining operations, control mountain pressure, reduce possible losses of minerals during excavation, prevent the occurrence of underground fires, as well as sudden emissions of coal and gas, protect objects in residential areas.