

УДК 622.81:519.24

Кулакова С. И.,
к.т.н. Павлов В. И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, Svet.Kulakova@gmail.com)

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ НА ОЧИСТНОЙ ЗАБОЙ

Проведено исследование процесса метановыделения в части уточнения влияния высоких нагрузок на его неравномерность. Выполнен кросс-спектральный анализ взаимосвязи метановыделения с нагрузкой. Установлено, что с увеличением нагрузки на механизированный комплекс большие значения мощности спектра метановыделения смещаются в высокочастотную часть и появляются циклические компоненты, согласованные с технологическими ритмами процесса угледобычи.

Ключевые слова: механизированный комплекс, высокие нагрузки, метановыделение, спектральный анализ, спектральная плотность, кросс-спектральный анализ, когерентность.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. С увеличением добычи угля за счёт использования современных, более производительных механизированных комплексов обнаружилось новые тенденции в динамике метановыделения — при достижении высоких нагрузок дебит метана уменьшается. Согласно нормативной методике [1] прогнозные значения метановыделения должны, наоборот, увеличиваться. Исходя из этой новой закономерности, обоснование необходимого количества воздуха для проветривания требует пересмотра. Необходимы дополнительные исследования влияния нагрузки на процесс метановыделения в части уточнения влияния на его неравномерность.

Анализ исследований и публикаций. Оценка процесса метановыделения коэффициентом неравномерности, используемая в нормативной методике [1], основывается на представлении о случайности текущих значений. Исследования изменений значений метановыделения во времени как стохастического процесса позволили установить, кроме случайной составляющей, наличие детерминированных компонент, имеющих связь со временем [2]. В работах МакНИИ [2, 3] показано, что в динамике изменения концентрации метана необходимо выделять низко-

частотную часть, задающую тренд процессу, и высокочастотную часть, складывающуюся из множества циклических составляющих. Наиболее опасные, длительные превышения допустимых концентраций метана происходят при наложении больших амплитуд низкочастотных колебаний с высокочастотными составляющими. Эти закономерности положены в основу усовершенствования алгоритма срабатывания аппаратуры автоматического контроля концентрации метана [3].

В исследованиях лаборатории газодинамики угольных месторождений института угля и углехимии СО РАН под руководством Полевщикова Г. Я. [4] доказана идентичность между изменениями метановыделения и динамикой геомеханических процессов. Развитие сдвижений в выработанном пространстве происходит по геомеханическим слоям, начиная с нижних и до земной поверхности, что является причиной низкочастотных колебаний метановыделения с большим периодом времени и амплитудой. При этом увеличение скорости подвигания очистных забоев приводит к увеличению шагов обрушения подрабатываемых слоёв и снижению амплитуды колебания метановыделения.

Подобные выводы получены и в работе [5]. При достижении высоких нагрузок,

согласно математическому моделированию, ожидается качественное и количественное изменение в поведении подрабатываемых породных слоёв, увеличивается шаг обрушения, процесс обрушения постепенно переходит в плавный погиб и снижается вертикальная газовая проницаемость массива.

Профессором Черняком И. Л. исследована периодичность сдвижения геомеханических слоёв с помощью представления динамики опусканий кровли частотным спектром. В работе [6] установлена связь между геомеханическими слоями и низкочастотной частью спектра смещения пород во времени.

Таким образом, на настоящий момент исследования влияния нагрузки на детерминированные компоненты случайного процесса метановыделения не проводились, установлены лишь косвенные факты этого влияния. Для практического использования новых закономерностей процесса метановыделения, противоречащих устоявшимся представлениям, требуется детальное изучение его неравномерности. Как следует из обзора публикаций, использование спектрального анализа предоставляет дополнительные возможности по поиску решений рассматриваемой актуальной проблемы.

Цель работы — исследовать влияние нагрузок на неравномерность процесса метановыделения методами спектрального анализа.

В работе поставлены следующие задачи:

1. Составить сопряжённые ряды изменения во времени метановыделения и нагрузки на очистной забой.

2. Оценить изменения спектральной плотности процесса метановыделения вследствие увеличения уровня нагрузки.

3. Установить когерентность частотных спектров метановыделения и нагрузки.

4. Произвести идентификацию частотных спектров метановыделения и нагрузки.

Изложение материала и его результаты. Для анализа были взяты показатели работы и результаты наблюдений за 18 месяцев по 28-й Орловской лаве пласта k_2

шахты «Молодогвардейская». Метановыделение в исходящую вентиляционную струю из очистного забоя определяли по данным участка ВТБ и АГЗ. Данные по суточной нагрузке выбирались из диспетчерской отчётности и сверялись с декадными маркшейдерскими замерами.

Для представления непрерывных записей концентрации метана дискретным временным рядом использовались средние значения за суточный интервал дискретизации. Подобный подход позволяет уменьшить при спектральном разложении ряда влияние случайной составляющей, а также наложение гармоник близких частот (их маскирование) [7].

Весь период наблюдений был разделён на два непрерывных периода: с высоким и низким уровнем нагрузки. Разделение производилось исходя из условий

$$A_{ср.н.} < 1500 \text{ и } A_{ср.в.} \geq 1500, \quad (1)$$

где $A_{ср.н.}$, $A_{ср.в.}$ — среднесуточное значение нагрузки в течение выбранного периода соответственно низкого и высокого уровня, т/сут.

В качестве критического значения было принято 1500 т/сут, начиная с которого, по данным работы [8], происходит резкое снижение метановыделения. Высокий уровень нагрузки является реализацией производственных возможностей современных механизированных комплексов и достигается также слаженной организацией труда, сокращением непредвиденных простоев, т. е. устойчивой, равномерной работой выемочного участка по нагрузке. Поэтому дополнительным критерием для разделения использован коэффициент вариации нагрузки [9]:

$$V_n > 30 \text{ и } V_g \leq 30, \quad (2)$$

где V_n , V_g — коэффициент вариации нагрузки в течение выделенного периода соответственно низкого и высокого уровня, %.

Параметры составленных рядов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Статистические характеристики среднесуточных рядов по процессам

Нагрузка на очистной забой				Метановыделение		
Уровень	Ряд	A_{cp} , т/сут	V , %	Ряд	I_{cp} , м ³ /мин	V , %
высокий ($A_{cp} \geq 1500$ т/сут; $V \leq 30\%$)	A_1	2024	25	I_1	8,3	35
низкий ($A_{cp} < 1500$ т/сут; $V > 30\%$)	A_2	1065	49	I_2	8,8	17

В таблице приняты следующие обозначения:

A_1, I_1 — сопряжённые ряды соответственно среднесуточной метанообильности и суточных нагрузок высокого уровня;

A_2, I_2 — сопряжённые ряды соответственно среднесуточной метанообильности и суточных нагрузок низкого уровня;

A_{cp}, I_{cp} — среднее значение соответственно нагрузки и метановыделения за анализируемый период;

V — коэффициент вариации, %.

Для обеспечения возможности сравнения рядов их длины были выбраны одинаковыми. Как следует из таблицы 1, разделение наблюдений на периоды высоких и низких нагрузок соответствует условиям (1) и (2). Показатели по выделенным периодам существенно различаются, что важно для задач, решаемых в данной работе. Уровень высоких нагрузок выше, а коэффициент вариации меньше в 2 раза. Выборки метановыделения при высоких и низких нагрузках статистически различимы по t -критерию.

Представление случайного процесса с помощью спектра допустимо при условии обеспечения стационарности ряда. Общеизвестно, что временные ряды метановыделения и нагрузки большой длительности являются нестационарными из-за наличия тренда, вызванного присутствием низких частот с периодом больше длины ряда. Наиболее просто стационарность ряда

обеспечивается цифровым фильтром первых разностей:

$$x_t = X_t - X_{t-1}, \quad (3)$$

где x_t — текущее значение ряда первой разности;

X_t, X_{t-1} — соответственно текущее и предыдущее значения в исходном временном ряде.

Для сравнительного спектрального анализа полученных рядов первых разностей использованы следующие характеристики [10]:

P_A, P_I — мощность гармоник соответственно нагрузки и метанообильности;

P_{AI} — кросс-спектральная мощность гармоник нагрузки и метанообильности;

k — коэффициент когерентности, характеризующий степень связи, согласованности гармоник.

В результате преобразования Фурье получено 83 частоты по каждому ряду длиной 166 суток. Распределение их мощности по частотному спектру для рядов I_1 и I_2 приведено на рисунке 1, где визуально наблюдается значительное различие по всему спектру.

Представляет интерес сравнение дисперсий отдельных полос частотного спектра. Первая полоса была ограничена частотами от 0 до $0,15 \text{ сут}^{-1}$ и включила периоды обрушения пород основной кровли от 6 и более суток. Вторая полоса от $0,15$ до

0,30 сут⁻¹ включила периоды обрушения непосредственной кровли от 3 до 6 суток. Третья полоса — интервал от 0,30 сут⁻¹ до максимального значения частоты спектра 0,50 сут⁻¹. Дисперсии полос рассчитаны по формуле [10]

$$D_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (4)$$

где n — количество частот в полосе спектра.

Результаты расчётов по (4) приведены в таблице 2.

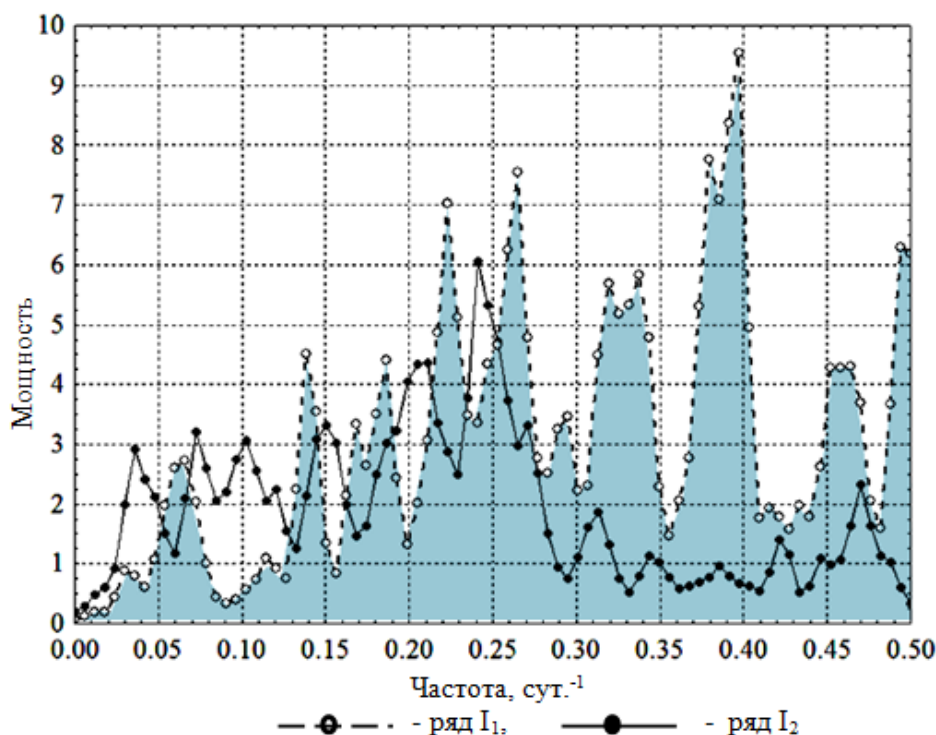


Рисунок 1 Плотность мощности частотного спектра рядов I_1 и I_2

Таблица 2

Распределение дисперсии рядов метанообильности по полосам частот

Ряд метановыделения	1-я полоса частот от 0 до 0,15 сут ⁻¹		2-я полоса частот от 0,15 до 0,30 сут ⁻¹		3-я полоса частот от 0,30 до 0,50 сут ⁻¹		Дисперсия ряда
	$\sum P_i$	D_n	$\sum P_i$	D_n	$\sum P_i$	D_n	
I_1	31,59	0,38	91,35	1,10	135,00	1,63	3,10
I_2	51,48	0,62	75,08	0,90	32,59	0,39	1,92

В полосе низких частот от 0 до 0,15 сут⁻¹ при высоком уровне нагрузок наблюдается значительно меньшая (на 38,6 %) дисперсия. Этот факт, как следует из работы [5], объясняется проявлениями плавного прогиба верхних метаноносных слоёв и снижением их газовой проницаемости. В следующих полосах дисперсия ряда I_1 , на-

оборот, больше дисперсии ряда I_2 : во второй полосе — на 17,8 % и в третьей полосе — на 75,9 %. Эти изменения дисперсии свидетельствуют о росте вклада гармоник более высокой частоты в неравномерность процесса метановыделения. Смещение мощности спектра в высокочастотную часть отражает изменение баланса метано-

выделения из подрабатываемых источников, установленное непосредственными замерами метановыделения из дегазационных скважин [11]. Это изменение заключается в следующем: при больших скоростях подвигания очистных забоев (больших нагрузках) уменьшается абсолютное газовыделение из наиболее удалённых источников и увеличивается из близкорасположенных сближенных пластов и вмещающих пород.

Наблюдаемые противоположные изменения дисперсии в третьей полосе, по сравнению со второй, в обоих рядах (рис. 2) следует отнести к неслучайным. Эти изменения могут являться следствием влияния неравномерности нагрузки. Известно, что процесс угледобычи на выемочном участке имеет организационные циклы: технологические выемочные циклы; чередование добычных и ремонтных смен; недельную цикличность, связанную с выходными днями; месячное планирование добычи и т. п. Высокий уровень нагрузки обеспечивается проектной организацией работ, меньшими колебаниями нагрузки, что отражается в низком значении коэффициента вариации (табл. 1).

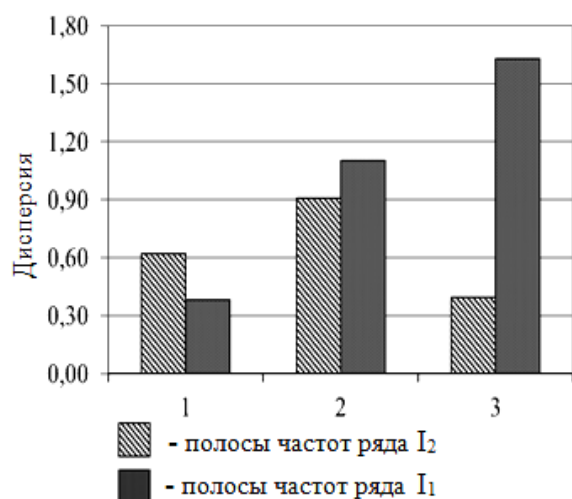


Рисунок 2 Диаграмма сравнения дисперсии спектральных полос рядов I_1 и I_2

Для оценки прямой связи гармоник процессов метановыделения и угледобычи была проведена оценка кросс-спектральных характеристик значимых гармоник сопряжённых рядов A_1 , I_1 , а также A_2 , I_2 . Значимость вклада гармоник в общую дисперсию ряда метановыделения оценивалась по статистическому F -критерию при уровне значимости 0,05. По ряду I_1 установлено 10 значимых гармоник, а по ряду I_2 — 8.

Далее был проведён анализ согласованности значимых гармоник рядов метановыделения, сопряжённых с аналогичными гармониками рядов нагрузки. Решение о наличии связи принималось исходя из сравнительно высоких значений совместной мощности гармоник (P_{AI}) и коэффициента их когерентности (k).

При низком уровне угледобычи все значимые гармоники метанообильности не согласованы с гармониками ряда нагрузки. Две гармоники имеют высокие значения коэффициента k (0,78 и 0,66), но отрицательные значения P_{AI} , что свидетельствует о несогласованности фаз гармоник нагрузки и метановыделения. Остальные шесть значимых гармоник с положительными значениями P_{AI} имеют низкие коэффициенты когерентности (рис. 3).

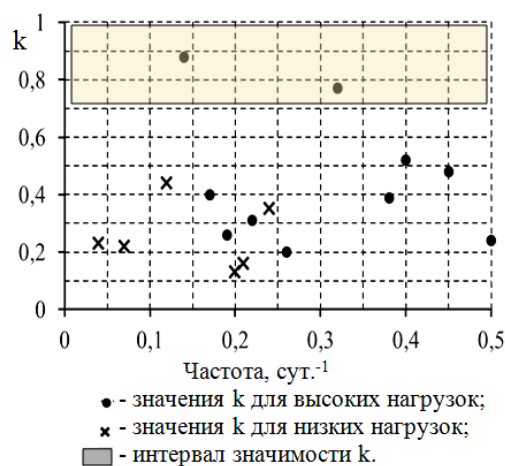


Рисунок 3 Оценка согласованности гармоник рядов A_2 , I_2 и A_1 , I_1

При высоком уровне нагрузок проявляется связь с нагрузкой двух гармоник метановыделения с частотами $0,14 \text{ сут}^{-1}$ (период 7,2 суток) и $0,32 \text{ сут}^{-1}$ (период 3,1 сут). Значимость связи подтверждается статистической достоверностью не ниже 95 % по критерию Стьюдента. Наибольшая связь наблюдается у гармоники с периодом, практически равным одной неделе (7,2 суток). Оценка связи на этой частоте максимальная ($k=0,88$), а согласованная мощность гармоник $P_{AI}=1689$ больше средней по спектру в 2,6 раза. Отсюда следует, что повышение технологической ритмичности работы выемочного участка при высоких нагрузках определяет возникновение соответствующих гармонических колебаний метановыделения.

Выводы. Высокие нагрузки на современные высокопроизводительные механизированные комплексы вызывают изменение внутренней структуры процесса метановыделения.

При увеличении нагрузки на забой:

– амплитуда низкочастотных колебаний значительно снижается, что свидетельствует об уменьшении интенсивности мета-

новыделения из отдалённых в кровле метаноносных слоёв;

– вклад в дисперсию процесса высокочастотной части спектра резко возрастает, и поэтому происходит увеличение неравномерности метановыделения;

– возникают детерминированные колебания метановыделения, вызванные технологическими ритмами процесса угледобычи на выемочном участке.

Выявленные связи циклических компонент процессов метановыделения и нагрузки на выемочный участок создают предпосылки к разработке математической модели текущего прогноза метановыделения и к управлению им за счёт научно обоснованного регулирования текущей суточной нагрузки. С этой целью целесообразно исследование области высоких частот для выявления циклических компонент метановыделения периода менее суток. Изучение неравномерности метановыделения в течение суток важно также для оптимизации работы автоматической газовой защиты и более надёжного обоснования необходимого количества воздуха для проветривания выемочного участка.

Библиографический список

1. ДНАОТ 1.1.30-6.09.93. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт [Текст] : утв. Приказом Гос. ком. Украины по надзору за охраной труда № 131 от 20.12.1993. — К. : Основа, 1994. — 312 с.
2. Иванов, Ю. А. Исследование частотной структуры процесса изменения концентрации метана на выемочных участках [Текст] / Ю. А. Иванов // Молодые ученые — научно-техническому прогрессу в угольной промышленности : матер. IV респуб. науч.-технич. конф. — Донецк, 1984. — С. 133–134.
3. Бусыгин, К. К. Усовершенствование алгоритма срабатывания аппаратуры автоматического контроля концентрации метана [Текст] / К. К. Бусыгин, Ю. А. Иванов // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах : сб. трудов МакНИИ. — Макеевка : МакНИИ, 1986. — С. 27–32.
4. Полевщиков, Г. Я. Газокинетический паттерн разрабатываемого массива горных пород [Текст] / Г. Я. Полевщиков, Е. Н. Козырева // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2002. — № 11. — С. 117–120.
5. Бокий, Б. В. Влияние скорости подвигания на напряжённо-деформированное состояние и газовую проницаемость массива [Текст] / Б. В. Бокий, О. И. Касимов, И. В. Назимко // Уголь Украины. — 2009. — № 11. — С. 9–13.
6. Черняк, И. Л. Применение гармонического анализа для исследования проявлений горного давления в очистных забоях [Текст] / И. Л. Черняк // Уголь. — 1989. — № 7. — С. 7–10.

7. Хургин, З. Я. Методика статистической обработки случайных процессов на ЭВМ [Текст] / З. Я. Хургин, Г. М. Левини, О. П. Земскова. — М. : ИГД им. А. А. Скочинского, 1976. — 28 с.
8. Касимов, О. И. Метановыделение в очистные выработки угольных шахт [Текст] / О. И. Касимов, Б. В. Бокий, И. В. Назимко // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. — 2007. — № 1. — С. 232–238.
9. Сургай, Н. С. Надёжность функционирования угольных шахт [Текст] / Н. С. Сургай. — Д. : Арт-Пресс. — 1998. — 192 с.
10. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения [Текст]. В 2-х т. Т. 1 / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. — М. : Мир, 1971 — Т. 1. — 316 с.
11. Харин, Е. Н. Комплексный и раздельный способы прогноза газовой выделенности из подрабатываемых угольных пластов и пород [Текст] / Е. Н. Харин, Н. И. Антощенко, С. И. Кулакова, Л. А. Чепурная // Школа підземної розробки : матер. VI міжнарод. наук.-практ. конф.. — Д. : НГУ, 2012. — С. 229–242.

© Кулакова С. И.© Павлов В. И.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г.,
д.т.н., с.н.с. НИИГД «Респиратор» Кудиновым Ю. В.**

Статья поступила в редакцию 19.02.20.

Кулакова С. И., к.т.н. Павлов В. И. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, Svet.Kulakova@gmail.com)

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ МЕТАНОВИДІЛЕННЯ ПРИ ПІДВИЩЕННІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЧИСНИЙ ВИБІЙ

Проведено дослідження процесу метановиділення в частині уточнення впливу високих навантажень на його нерівномірність. Виконано крос-спектральний аналіз його взаємозв'язку з навантаженням. Встановлено, що зі збільшенням навантаження на механізований комплекс великі значення потужності спектра метановиділення зміщуються в високочастотну частину і з'являються циклічні компоненти, узгоджені з технологічними ритмами процесу вуглевидобутку.

Ключові слова: механізований комплекс, високі навантаження, метановиділення, спектральний аналіз, спектральна щільність, крос-спектральний аналіз, когерентність.

Kulakova S. I., PhD in Engineering Pavlov V. I. (DonSTU, Alchevsk, LPR, Svet.Kulakova@gmail.com)

SPECTRAL ANALYSIS OF THE METHANE RELEASE PROCESS WHEN THE LOAD ON THE BREAKAGE FACE INCREASE

Study of the methane release process has been carried out to clarify the effect of high loads on its unevenness. A cross-spectral analysis of the interrelation between methane release and load was performed. It was found that with increasing load on the mechanized complex, large values of the power of the methane release spectrum are shifted to the high-frequency part and cyclic components appear that are consistent with the technological rhythms of the coal mining process.

Key words: mechanized complex, high loads, methane release, spectral analysis, spectral density, cross-spectral analysis, coherence.