

Л.Е. Подлипенская, В.И. Павлов, С.И. Кулакова

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ СМЕЖНЫХ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ

Динамика метанообильности смежных лав угольной шахты по мере развития очистных работ. Аналитические зависимости. Прогнозные значения метанообильности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: метанообильность, смежные лавы, очистные работы, статистические гипотезы.

Динаміка метановості суміжних лав вугільної шахти в міру розвитку очисних робіт. Аналітичні залежності. Прогнозні значення метановості.

К л ю ч о в і с л о в а: метановість, суміжні лави, очисні роботи, статистичні гіпотези.

Постановка проблемы. Количество воздуха, необходимого для проветривания очистных забоев, определяется на основе прогноза ожидаемой метанообильности горных выработок по методике [1,2], основанной на обработке результатов измерений газообильности лавы-аналога за период устойчивой её работы после посадки основной кровли не менее, чем за три предыдущих месяца. Расчет выполняется, исходя из средней нагрузки при стабильном и равномерном подвигании лавы.

В действительности чаще всего лава работает неравномерно во времени и с интенсивностью, отличающейся от планируемой. По мере отработки пласта изменяются также и горно-геологические условия. Кроме того, происходит неконтролируемая активизация геомеханических процессов в выработанном пространстве. Все это приводит к тому, что на практике часто проектные показатели проветривания во время отработки выемочных участков не обеспечивают плановых технико-экономических показателей работы лав. Не существует двух абсолютно одинаковых выемочных участков с точки зрения метановыделения, обрабатываемых в пределах одного шахтного поля. Но при этом наблюдаются общие тенденции в изменении метанообильности смежных участков. Поэтому исследование пределов применимости статистической информации по выработке-аналогу при прогнозе ожидаемой метанообильности проектируемого участка является актуальной научной задачей.

Анализ исследований и публикаций. Интенсивная разгрузка газоносных пластов при отработке смежными лавами с полным обрушением кровли сопровождается адекватной реакцией газового потенциала, проявляющейся в виде квазистатических и динамических

изменений метанообильности выемочных участков, являющихся результатом не только первичного, но и вторичного сдвижения пород, составляющего в некоторых условиях существенную долю газового баланса участка.

На данный момент накоплен значительный экспериментальный материал, на базе которого установлены особенности газовой выделения при активизации сдвижения пород на качественном уровне [3]. Вместе с тем для эффективной борьбы с опасными газопроявлениями при отработке смежных лав необходимы количественные зависимости, характеризующие изменение их газового баланса с учетом развития горных работ в двух взаимно перпендикулярных направлениях, связанных с удалением лавы от разрезной печи и последовательностью отработки участков в шахтном поле. Существующие нормативные документы [1,2] предполагают прямую проекцию динамики газовой выделения выработки-аналога на проектируемый участок. Корректировка проводится только на планируемый средний уровень суточной нагрузки, постоянный во времени. Вместе с тем, экспериментально установлено [4], что увеличение общей ширины выработанного пространства отработанных лав оказывает существенное влияние на расположение максимума газовой выделения эксплуатируемого участка.

Цель статьи. Определить условия обоснованного использования статистических данных лавы-аналога при проектировании проветривания выемочного участка при отработке пласта смежными лавами.

Результаты исследований. Экспериментальные наблюдения проводились при отработке пластов антрацита ℓ_2^6 и ℓ_3 на шахте имени газеты «Известия» ГХК «Донбассантрацит» (Красный Луч Луганской обл). Мощность пластов составляла 0,9...1,0 м, угол падения – до 8 градусов. Отработка лав производилась длинными столбами по восстанию механизированными комплексами КМ-97. Первой в крыле шахтного поля была подготовлена и отработана 2-я западная лава. Эксплуатация 3-й западной лавы также начиналась в окружении неподроботанного массива. Отработка 2-бис и 4-й западных лав начиналась при наличии выработанных пространств ранее отработанных лав в условиях еще неполной подработки пород, а 6, 7, 8 и 9-я лавы уже примыкали к выработанному пространству шириной более 420 м, следствием чего стала полная подработка земной поверхности из-за ведения очистных работ на глубине около 300 м [4]. Наблюдения заключались в измерении расхода газа в исходящих вентиляционных струях в течение нескольких лет с периодичностью 1...5 суток.

По мере отработки выемочного поля содержание газа в исходящей вентиляционной струе вначале возрастает до некоторого I_{\max} , а затем отмечается затухание интенсивности газовой выделения. Так как процесс

газовыделения из всех своих источников определяется различными факторами, которые изменяются во времени и пространстве, то фактический ряд метанообильности представляет собой динамическую реакцию системы «газ-уголь» на нарушения равновесного состояния, замаскированную неконтролируемыми возмущениями, совокупность которых образует «шум». Прогноз метанообильности проектируемой лавы возможен только на основе количественных закономерностей газовыделения в ранее отработанных смежных лавах, что предполагает знание структуры ряда и поведения его компонент. При проектировании участка важным моментом является определение расстояния между забоем и разрезной печью, при котором формируется максимальное газовыделение. Решение указанных задач возможно современными методами, включающими как чисто статистические методы, так и комбинированные методы математического моделирования.

Обработка результатов измерений, основанная на использовании аппроксимации по методу наименьших квадратов (МНК), требует априорной информации о функции измеряемого процесса. При наличии единственной реализации результатов измерений и ограниченном объеме априорной информации в работах С.М. Переверткина, О.Н. Новоселова, А.Ф. Фомина предлагается разбивать исходную реализацию случайного нестационарного сигнала на квазистационарные участки с последующей их аппроксимацией полиномом не выше второй степени. На практике широкое распространение получил метод скользящего среднего и его модификации (метод взвешенного скользящего среднего, медианное сглаживание и др.). Наличие априорных сведений о функции полезного сигнала и вероятностных характеристиках аддитивной помехи позволяют перейти к рекуррентной форме МНК. Сюда можно отнести линейный алгоритм $\alpha - \beta - \gamma$ типа, фильтр Калмана и его модификации. Для сглаживания случайных нестационарных процессов с линейным законом изменения математического ожидания целесообразно использование оператора Бернштейна.

К спектральным методам относят собственно метод Стокса, преобразования Фурье и разновидности вейвлет-анализа, активно развивающегося в последние годы. С помощью вейвлет-преобразования нестационарный случайный сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатия (растяжения) и сдвигов. Функцию-прототип называют анализирующим или материнским вейвлетом (mother-wavelet), выбранным для исследования конкретного сигнала. Всем спектральным методам обработки присущи систематические погрешности, связанные с процедурой перехода в частотную область.

В последнее время широкое распространение получил метод главных компонент «Гусеница» (Singular Spectrum Analysis или SSA), в котором

одномерный временной ряд преобразуется в многомерный, с исследованием многомерной траектории методом главных компонент (ГК) и последующим восстановлением одномерного ряда.

Применяя SSA-метод к каждому ряду наблюдений метанообильности $\{I_i^k\}$ и группируя полученные результаты по степени подобия основных характеристик, можно выделить полезные общие сигналы (конгруэнтны), и установить возможность их использования для прогнозирования тенденций метанообильности при отработке пласта смежными лавами.

Базовый алгоритм метода «Гусеница» можно разбить на четыре этапа [5].

Этап 1. Развертка одномерного ряда в многомерный.

Выберем некоторое число $M < N$, называемое длиной «Гусеницы», и представим первые M значений последовательности $\{I_i^k\}$ в качестве первой строки матрицы X . В качестве второй строки берем значения последовательности от x_2 по x_{M+1} . Последней строкой с номером $k=N-M+1$ будут последние M элементов последовательности. Эту матрицу, элементы которой равны $x_{ij} = x_{i+j-1}$, можно рассматривать как M -мерную выборку объема k или M -мерный временной ряд, которому соответствует M -мерная траектория (ломаная в M -мерном пространстве из $k-1$ звена). Отметим, что матрица X (будем называть ее матрицей ряда) представлена в традиционном для прикладной статистики виде «строка - индивид, столбец – признак». Далее по обычной схеме (за исключением стандартизации признаков) проводится анализ главных компонент (АГК).

Этап 2. АГК: сингулярное разложение выборочной ковариационной матрицы.

Сначала вычисляется ковариационная матрица $V = (1/k)X^T X$. Следующий шаг в АГК состоит в вычислении собственных чисел и собственных векторов матрицы V , т.е. разложении ее $V = PLP^T$, где L – диагональная матрица, на диагонали которой стоят упорядоченные по убыванию собственные числа, а P – ортогональная матрица собственных векторов матрицы V . Матрицы L и P совместно имеют множество интерпретаций, основанных на АГК. В частности, матрицу P можно рассматривать как матрицу перехода к главным компонентам $XP = Y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$.

Если изучается выборка из случайной совокупности, то собственные числа матрицы V являются выборочными дисперсиями соответствующих ГК, а квадратные корни из них – выборочными стандартами. Графическое представление собственных чисел и некоторых функций от них в АГК традиционно используется для выявления структуры исследуемой совокупности и отбора и интерпретации ГК.

Заметим также, что при выборе длины «Гусеницы», равной $N-M+1$, собственные вектора и ГК (с точностью до нормировки) просто меняются местами.

Этап 3. Отбор ГК.

В силу свойств матрицы P мы можем представить матрицу ряда X как $X = Y P^T$ и получить разложение матрицы ряда по ортогональным составляющим ГК. В то же время преобразование $y_j = X p_j$ является линейным преобразованием исходного процесса с помощью дискретного оператора свертки.

Следовательно, процедура «Гусеница» порождает набор линейных фильтров, настроенных на составляющие исходного процесса. При этом собственные векторы матрицы V выступают в роли переходных функций соответствующих фильтров. Изучение как собственных векторов, так и ГК, полученных в результате линейной фильтрации, может дать много интересной информации о структуре изучаемого процесса и свойствах его слагаемых. В частности, среди ГК можно выделить:

- относящиеся к тренду (изменяющиеся медленно);
- периодические;
- «шумовые».

Для нахождения периодических составляющих большую визуальную информацию дает изучение двумерных графиков, аналогичных фигурам Лиссажу, когда по осям x и y откладываются различные пары собственных векторов или ГК. Известно, что если по осям откладывать значения синусоиды одной и той же частоты, но с разными фазами, то на плоскости получается эллипс. Из ортогональности собственных векторов и ГК следует, что сдвиг фаз между такими парами обязательно будет равен $\pm\pi/2$ и эллипс переходит в окружность.

Этап 4. Восстановление одномерного ряда.

Следующим ключевым элементом метода «Гусеница» является процедура восстановления, основанная на разложении $X = Y P^T$. Будем говорить, что восстановление проводится по данному набору ГК, если при применении формулы восстановления $X = Y^* P^T$ матрица Y^* получена из матрицы Y обнулением всех, не входящих в набор, главных компонент. Таким образом, получаем приближение матрицы ряда или интерпретируемую часть этой матрицы.

При исследовании динамики метановыделения наибольший интерес представляет не только конечное восстановление динамического ряда, но и промежуточное разложение ряда на компоненты, дающее возможность интерпретировать каждую отдельную составляющую как отклик исследуемого показателя на изменение горно-геологических и технологических факторов горного производства. Для этой цели используем сингулярное разложение матрицы X :

$$X = X_1 + \dots + X_d ,$$

где $X_i = \sqrt{\lambda_i} \cdot U_i \cdot V_i^T$ – i -я компонента разложения;

(λ_i, U_i, V_i^T) – i -я собственная тройка сингулярного разложения.

Применение метода SSA при анализе рядов динамики метанообильности смежных лав позволяет выяснить структуру каждого ряда, идентифицировав выделенные компоненты по специфическим особенностям, и провести комплексный анализ рядов на основе группировки идентичностей как внутри каждого ряда, так и сходных конгруэнт всех рядов. Такой подход позволяет выделить общие и индивидуальные особенности этих рядов.

В результате получим разложение исходных рядов метанообильности на составляющие:

$$I_i^k = \Psi_k + \sum_{r=1}^{n_k} \Phi_k^r + \sum_{j=1}^{m_k} \Lambda_k^j + E_k,$$

где $i = \overline{1 \div N_k}$; $k = \overline{1 \div 4}$ – номер динамических рядов метанообильности;

N_k – длина k -го ряда;

Ψ_k – конгруэнты k -го ряда;

Φ_k^r – периодические компоненты;

Λ_k^j – непериодические («хвостатые») компоненты;

E_k – «шумовые» компоненты.

Важным моментом в понимании природы исследуемых рядов является изучение собственных чисел ковариационной матрицы $S = X \cdot X^T$, представленных на рисунке 1.

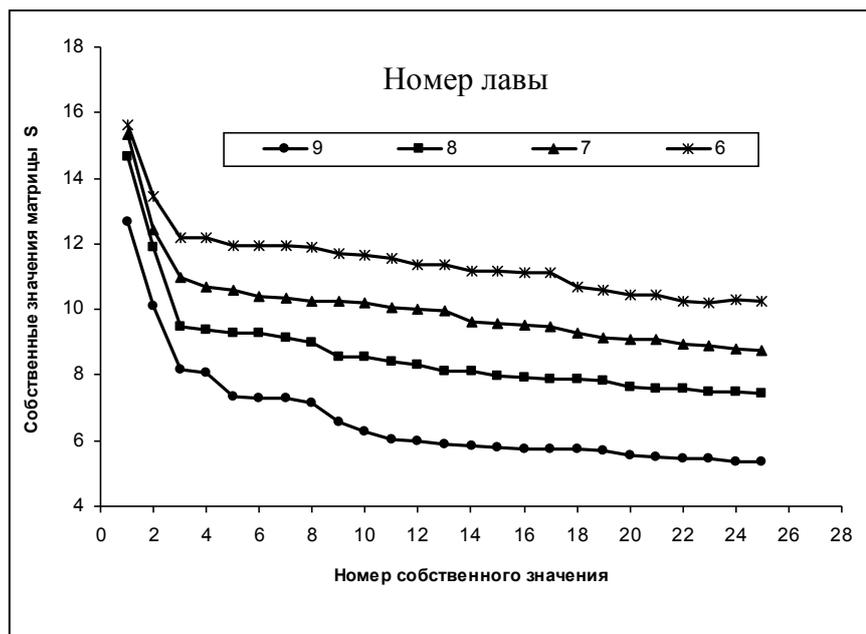


Рисунок 1 – Собственные числа ковариационной матрицы

Исходя из этого, можно предположить, каким количеством ГК описывается ряд $\{I_i^k\}$. Наиболее значимые для всех лав первые пять-шесть

компонент, а начиная с 10–15-й находится «шум» (равномерное убывание очень маленьких собственных чисел).

Процедура «Гусеница» порождает набор линейных фильтров, настроенных на составляющие исходного процесса. При этом собственные векторы матрицы S выступают в роли переходных функций соответствующих фильтров. Изучение собственных векторов U_i и главных компонент Y_i , полученных в результате линейной фильтрации, может дать много интересной информации о структуре изучаемого процесса и свойствах составляющих его слагаемых. Для облегчения разбиения ГК по парам служат двухмерные графики собственных векторов, анализ которых подтверждает тренд-циклическую природу двух первых ГК, в то время как остальные показывают на наличие цикличности, осложненной «шумами». Это связано с плохой разделимостью циклических компонент и «шума», поэтому требуется их более детальный анализ с использованием технологий гибридного прогнозирования.

Совпадение тенденций в первых двух ГК говорит о подобии процессов в смежных лавах, что позволяет сформировать конгруэнты $\{\Psi_k\}$ для каждого ряда метанообильности, которые можно трактовать как показатели, характеризующие глобальные тенденции рядов метанообильности $\{I_i^k\}$, свободные от шумов. Следует отметить, что конгруэнты являются более широким понятием, чем тренд процесса, полученный методами усреднения, например, методом скользящего среднего. Конгруэнту, в силу процедуры ее определения и с учетом того, что на ее долю приходится до 80 % общей дисперсии ряда, следует рассматривать как отражение влияния одного фактора (или устойчивой группы взаимосвязанных факторов), который в данных условиях определяет динамику метанообильности. Идентификация конгруэнт требует дополнительных исследований, в том числе нематематическими методами. Однако выделенные конгруэнты смежных лав на данном этапе исследований позволяют утверждать:

а) общий вид конгруэнт смежных лав совпадает, т.к. сначала наблюдается их рост до максимального значения, затем плавное асимптотическое приближение к фиксированному уровню;

б) максимум конгруэнты совпадает с глобальным максимумом метанообильности на выемочном участке.

Принимая во внимание подобие процессов газовыделения на участке, можно предположить закономерное смещение точки максимума по его длине и значения максимума метанообильности в зависимости от ширины выработанного пространства. При этом выделенные конгруэнты описываются аналитически, закономерности изменения максимумов имеют также аналитическое выражение, что позволяет получить количественный прогноз максимума метановыделения в проектируемой

лаве на основе информации по лаве-аналогу и с учетом увеличения геометрических размеров общего выработанного пространства смежных лав.

Пример. Поскольку при исследовании тенденций метановыделения для лав, имеющих общее выработанное пространство, принципиально важно начинать изучение с первой лавы, то в качестве примера проанализируем лавы, работавшие по пластам l_2^6 и l_3 указанной выше шахты. На рисунке 2 представлены конгруэнты трех последовательно отработываемых смежных лав, полученные вышеизложенным методом.

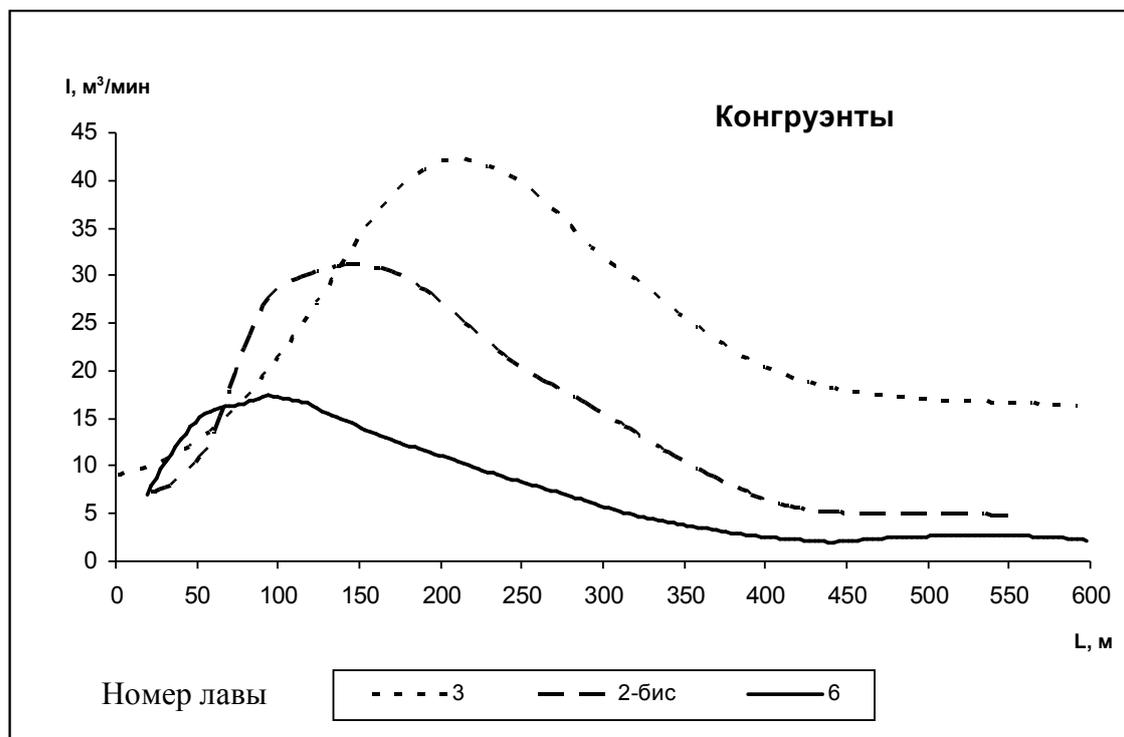


Рисунок 2 – Конгруэнты смежных лав

Аналитически выражение для конгруэнты первой лавы может быть представлено в виде:

$$(L - b)^2 = 2p(\Psi_1 - c), \quad (1)$$

где L – расстояние между очистным забоем и разрезной печью, м;

Ψ_1 – конгруэнта лавы;

b – расстояние от разрезной печи, при котором наступает максимум метановыделения, м;

c – значение максимума метановыделения, $\text{м}^3/\text{мин}$;

p – параметр, отвечающий за степень раскрытия кривой.

Все последующие конгруэнты могут быть описаны зависимостями вида:

$$(L - \alpha^k b)^2 = 2\beta^k p(\Psi_1 - \gamma^k c), \quad (2)$$

где $\alpha^k, \beta^k, \gamma^k$ – коэффициенты для k -й лавы, характеризующие точку наступления максимума (по L), форму кривой и значение максимума.

Оценки параметров зависимостей (1), (2) найдем обобщенным методом стохастической аппроксимации с оптимальным фильтром:

а) для первой (3-й западной) лавы:

$$(L - 210)^2 = -2 \cdot 300 \cdot (\Psi_1 - 42);$$

б) для второй (2-бис) лавы:

$$(L - 138)^2 = -2 \cdot 290 \cdot (\Psi_1 - 32);$$

в) для третьей (6-й) лавы:

$$(L - 98)^2 = -2 \cdot 305 \cdot (\Psi_1 - 17).$$

Аналогично определяются зависимости для остальных лав.

Представляет интерес изменение поправочных коэффициентов, поскольку их можно интерпретировать как показатели влияния ширины выработанного пространства отработанных смежных лав на точку и значение максимума метанообильности эксплуатируемой лавы. На рисунке 3 представлены значения коэффициентов $\alpha^k, \beta^k, \gamma^k$ для лав, отрабатывающих пласты l_2^6 и l_3 .

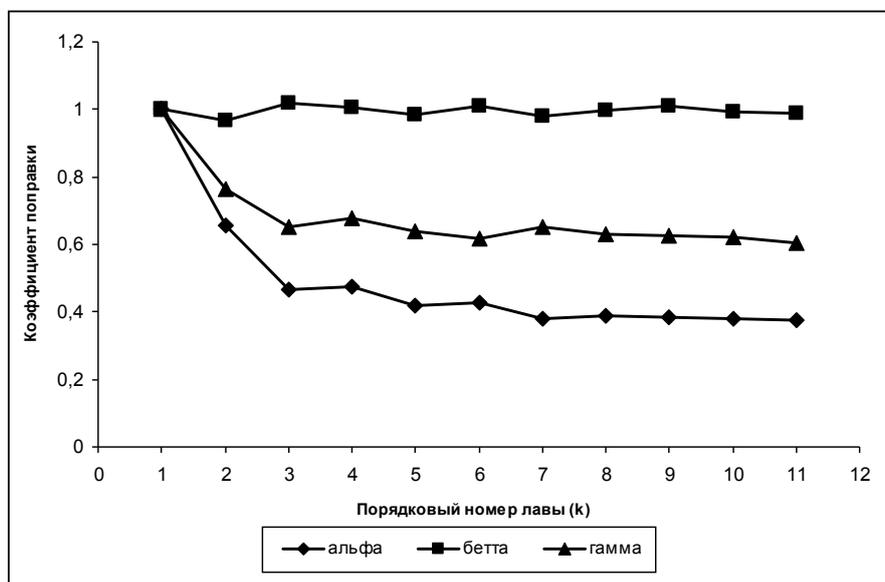


Рисунок 3 – Динамика изменения поправочных коэффициентов

Эти графики подтверждают экспериментально установленный факт [4], что с увеличением общей ширины выработанного пространства эксплуатируемой и отработанных лав уменьшается расстояние между очистным забоем и разрезной печью l_{max} , при котором достигается максимальное газовыделение (коэффициент α). При этом наиболее существенное уменьшение расстояния происходит до образования плоского дна мульды сдвижения на земной поверхности. После полной подработки пород это расстояние остается практически постоянным для одних и тех же горно-геологических условий. С увеличением ширины

выработанного пространства на определенной стадии развития очистных работ уменьшается не только расстояние, при котором достигается максимум метанообильности, но и его абсолютное значение I_{\max} (коэффициент γ).

Изменения коэффициента α более резкие, чем коэффициента γ , т.е. порядковый номер лавы (ширина общего выработанного пространства) оказывает большее влияние на точку наступления максимума ℓ_{\max} , чем на его значение I_{\max} . При этом раскрытие кривой не претерпевает существенных изменений при вводе новых лав в эксплуатацию, о чем свидетельствует почти постоянный коэффициент β . Для целей прогноза получены аналитические зависимости поправочных коэффициентов α^k , β^k , γ^k от номера лавы k ($k > 1$):

$$\alpha^k = \begin{cases} 1, & \text{если } k = 1 \\ 0,86 \cdot k^{-0,38}, & \text{если } k > 1 \end{cases}$$

$$\gamma^k = \begin{cases} 1, & \text{если } k = 1 \\ 0,89 \cdot k^{-0,18}, & \text{если } k > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta^k = 1, \quad k \geq 1.$$

При проектировании нового выемочного участка одним из ключевых моментов является определение расстояния ℓ_{\max} между очистным забоем и разрезной печью, при котором формируется максимальное газовыделение I_{\max} . На практике для этих целей используют данные по лаве-аналогу, но при этом не учитывается порядковый номер лавы (ширина общего выработанного пространства). В случае лав, имеющих общее выработанное пространство, прогнозные значения ℓ_{\max}^k и I_{\max}^k для k -й лавы, вводимой в эксплуатацию, на основании (3) могут быть с относительной ошибкой аппроксимации $\varepsilon = 6,4$ % найдены следующим образом:

$$\ell_{\max}^k = \begin{cases} \ell_{\max}^1, & k = 1 \\ \ell_{\max}^1 \cdot 0,66, & k = 2 \\ \ell_{\max}^{k-1} \cdot \left(1 + \frac{1}{k-1}\right)^{-0,38}, & k > 2 \end{cases}$$

$$I_{\max}^k = \begin{cases} I_{\max}^1, & k = 1 \\ I_{\max}^1 \cdot 0,79, & k = 2 \\ I_{\max}^{k-1} \cdot \left(1 + \frac{1}{k-1}\right)^{-0,18}, & k > 2 \end{cases}$$

где ℓ_{\max}^{k-1} , I_{\max}^{k-1} – расстояние очистного забоя от разрезной печи на котором наблюдается максимум метанообильности и его значение в $(k-1)$ -й лаве.

Выводы:

1. Изучение структуры рядов метанообильности смежных выемочных участков методом SSA позволило выявить условия обоснованного использования статистических данных лавы-аналога, общие тенденции в изменении их динамики, выраженные в аналитическом виде, и при прочих равных условиях установить количественные закономерности изменения максимума метанообильности выемочного участка от степени развития очистных работ в шахтном поле.

2. Предложены поправочные коэффициенты, с помощью которых можно получить прогнозные значения ℓ_{\max} и I_{\max} по данным лавы-аналога.

3. Для выяснения погрешности оценки предложенных зависимостей требуются дальнейшие исследования с привлечением данных по нескольким смежным лавам с сопоставимыми условиями отработки.

Список литературы

1. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Государственный нормативный акт об охране труда.– К.: Основа, 1994. – 312 с.
2. Руководство по дегазации угольных шахт.– М.: Недра, 1975.– 189 с.
3. Антощенко Н.И. Физико-математическая модель динамики метано-выделения из подрабатываемых угольных пластов / Н.И. Антощенко, С.И. Кулакова // Горный журнал. –2012. – №8. – С. 89-93.
4. Антощенко Н.И. Особенности газовыделения при удалении очистного забоя от разрезной печи / Н.И.Антощенко, С.Л.Сятковский, В.Д.Шепелевич // Уголь Украины. – 2006.– №10.– С.28-31.
5. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: уч.пос./ Н.Э.Голяндина. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.