

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  $\ell_2^6$  и  $\ell_3$  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;

$(\lambda_i, U_i, V_i^T)$  –  $i$ -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;

$\Psi_k$  – конгруэнтности  $k$ -го ряда;

$\Phi_k^r$  – периодические компоненты;

$\Lambda_k^j$  – 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.

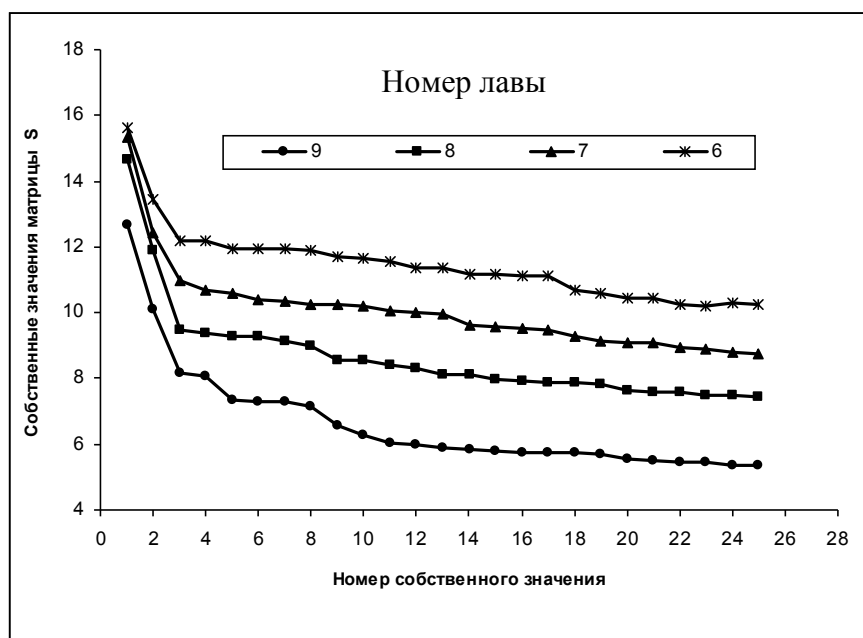


Рисунок 1 – Собственные числа ковариационной матрицы

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 газовой выделения 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.

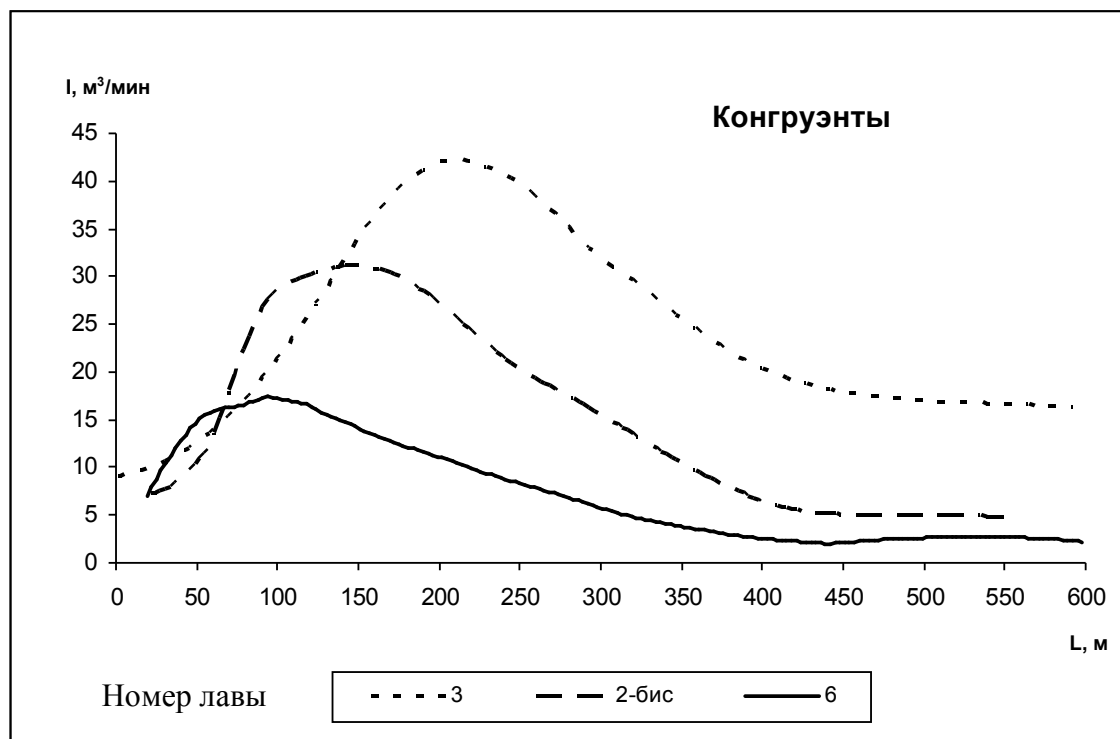


Рисунок 2 – Конгруэнты смежных лав

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;

$\Psi_1$  – 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  $l_3$ .

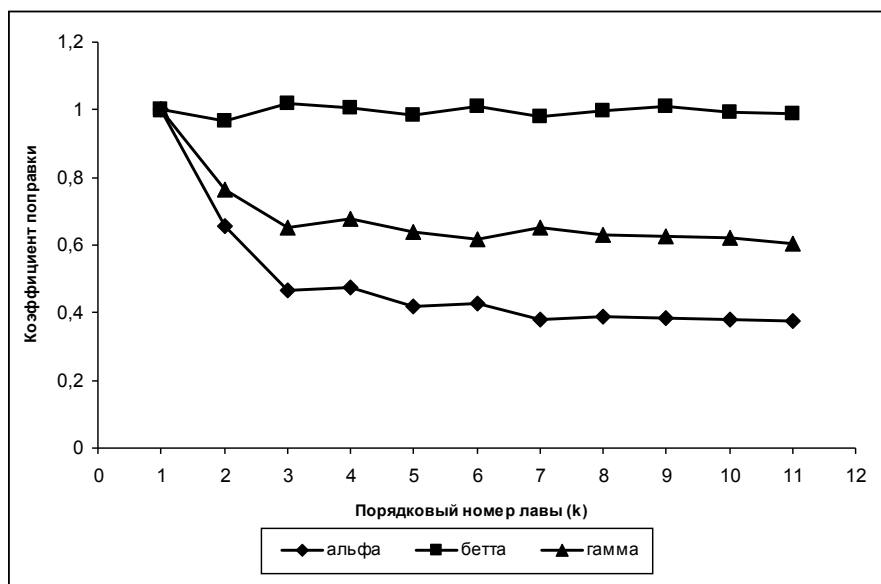


Рисунок 3 – Динамика изменения поправочных коэффициентов

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  $\alpha$ ). 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  $\gamma$ ).

Изменения коэффициента  $\alpha$  более резкие, чем коэффициента  $\gamma$ , т.е. порядковый номер лавы (ширина общего выработанного пространства) оказывает большее влияние на точку наступления максимума  $\ell_{\max}$ , 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  $\beta$ . Для целей прогноза получены аналитические зависимости поправочных коэффициентов  $\alpha^k$ ,  $\beta^k$ ,  $\gamma^k$  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  $\ell_{\max}$  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  $\ell_{\max}^k$  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  $\ell_{\max}^{k-1}$ ,  $I_{\max}^{k-1}$  – 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  $\ell_{\max}$  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.