

к.т.н., доц. Денисенко В. П.
ГОУ ВО «Донбасский государственный технический институт», г. Алчевск, ЛНР,
д.т.н., начальник ЭТЦ Малеев Н. В.
Гортехнадзор ДНР, г. Донецк, ДНР

ГОРНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗА МЕТАНООБИЛЬНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Точный и надежный прогноз метанообильности горных выработок является первоосновой для разработки эффективных и рациональных мероприятий по управлению метановыделением на выемочных участках. Проблема прогноза метанообильности отличается сложностью на всем протяжении развития угольной промышленности.

Горно-статистический метод прогноза метанообильности горных выработок является основным при расчете метанообильности в действующих шахтах [1]. Прогноз ожидаемой метанообильности осуществляется посредством корректировки фактической метанообильности лавы-аналога с учетом изменения основных технологических факторов проектируемой лавы (добычи угля, длины лавы, системы разработки) и природной метаносности угольных пластов. Влияние остальных факторов при этом не учитывается. В реальных условиях разработки литологический состав пород и тектоническая нарушенность могут изменяться в пределах выемочных полей как лавы-аналога, так и проектируемой лавы. Результаты исследований [2–4] показывают значительное влияние этих факторов на уровень метанообильности горных выработок. Принятая, в указанном методе прогноза, степенная зависимость ожидаемой метанообильности от добычи угля и длины лавы не отвечает физической сути процесса метановыделения в выработки [1, 5]. В работах [6] по результатам анализа фактической метанообильности при разработке пластов с различной степенью метаморфизма отмечено, что изменение длины лавы практически не оказывает влияния на изменение метанообильности. Этими авторами предложена степенная зависимость метанообильности от добычи угля, причем показатель степени численно равен коэффициенту, который учитывает прочностные свойства подрабатываемых пород и изменяется от 1,0 (для антрацитов) до 0,6 (для марок Г, Д) и ниже. Таким образом, статистический метод прогноза требует усовершенствования математической модели прогноза метанообильности с учетом влияния основных параметров лавы и условий разработки.

Цель работы состоит в усовершенствовании математической модели статистического прогноза метанообильности горных выработок с учетом экспериментально установленных зависимостей метанообильности от условий разработки для повышения его точности.

Экспериментальная часть работы проводилась с использованием фактических данных, полученных при отработке шахтопластов: k_5^H на ш. им. Н. П. Баракова, k_2^H на ш. «Самсоновская-Западная» в Краснодонском районе и l_6 на ш. «Белореченская», k_6^G на ш. «Никанор-Новая» в Луганском районе Донбасса. Природная газоносность исследуемых пластов изменялась в пределах 10–25 м³/т с.б.м. Выход летучих веществ 10–38 %. Глубина разработки 400–1100 м. Угольные пласты отрабатывались с применением различных способов подготовки и систем разработки. Длина лавы изменялась 160–320 м. Объем обработанной информации взят за 8 лет работы шахт.

К статистической обработке были приняты среднемесячные данные по выделению метана в выработки выемочных участков и дегазационные скважины, а также по объемам добытого угля. Кроме этого были проанализированы экспериментальные данные, полученные в условиях шахт им. газеты «Известия», «Краснолиманская» и ряда шахт Львовско-Волынского и Кузнецкого бассейнов [5, 7–9].

Расчет ожидаемой (прогнозной) метанообильности для каждого конкретного добычного участка вначале проводился в соответствии с [1] по формуле

$$I_p = I_{yч.ф.} \left(\frac{\ell_{оч.р.}}{\ell_{оч.ф.}} \right)^{0,4} \left(\frac{A_p}{A_ф} \right)^{0,6} \cdot k_{с.р.} \cdot k_{г.р.}, \text{ м}^3/\text{мин.}, \quad (1)$$

где I_f — фактическая метанообильность выемочного участка лавы-аналога, м³/мин.;

$\ell_{оч.р.}, \ell_{оч.ф.}$ — длина проектируемой и лавы-аналога соответственно, м;

$A_p, A_ф$ — нагрузка на проектируемую и лаву-аналог соответственно, т/сут.;

$k_{с.р.}$ — коэффициент, учитывающий изменение системы разработки;

$k_{г.р.}$ — коэффициент, учитывающий изменение метаноносности угля с глубиной.

Полученные прогнозные величины сравнивались с фактической (шахтной) метанообильностью и устанавливались абсолютные и относительные отклонения.

Применительно к условиям шахты им. Н. П. Бараркова на первом этапе последовательность расчетов соответствовала хронологическому порядку отработки пласта, при этом в качестве лавы-аналога в том же порядке принимались лавы, которые закончили работу раньше, чем проектируемые лавы. Значение коэффициента $k_{г.р.} = 1$ принималось таковым ввиду практически равной природной метаноносности пласта в пределах исследуемого участка. Первой в шахтном поле отработывала пласт Западная надрабатывающая лава по простиранию с использованием сплошной системы разработки вариант лава-штрек. Эта лава была принята в качестве аналога для 1 Северной лавы, выемочное поле которой подготавливалось к отработке по столбовой системе разработки — длинными столбами по падению. С учетом коэффициента, учитывающего изменение системы разработки, расчетная величина метанообильности оказалась ниже фактически наблюдаемой на 32 %.

Применительно к условиям отработки выемочного поля 3 Северной лавы, которая отработывала пласт по столбовой системе разработки ($k_{с.р.} = 1$) 1 Северная лава была принята в качестве лавы-аналога. Отклонение величины прогнозной метанообильности от фактической в этих условиях составило +28 %. Аналогично рассчитывалась величина прогнозной метанообильности для 5 Северной лавы, где в роли лавы-аналога выступала 3 Северная лава. Отклонение в этом случае составило — 34 %, прогнозная метанообильность превысила фактическую на указанную величину. 2 Северной лавой отработка выемочного поля (с июля 2007 г. по 2009 г.) велась в условиях примыкания поля к ранее отработанному столбу 1 Северной лавы (аналогично с 3 Северной лавой).

Величина прогнозной метанообильности 2 Северной лавы при использовании 1 Северной лавы в качестве аналога с учетом изменения столбовой системы разработки на комбинированную оказалась на 31 % ниже, чем фактическая. Для сравнения, величина прогнозной метанообильности 3 Северной лавы отклонилась на 32 % в ту же сторону. Наибольшее отклонение (+50 %) прогнозной метанообильности от фактической получено для условий Восточной надрабатывающей лавы. Пласт, в пределах выемочного поля этой лавы, отработывался по сплошной системе разработки лава-штрек (коренная лава). Лавой-аналогом являлась Западная надрабатывающая лава с аналогичной системой разработки. Отличительной особенностью геологических условий залегания пласта на участке Восточной надрабатывающей лавы является высокая тектоническая нарушенность углевмещающей толщи по сравнению с остальными участками. На всем протяжении выемочного поля была развита довольно крупная флексурная складка, осложненная серией малоамплитудных разрывов взбросового и сбросового характера. Простирание складки совпадало с простиранием пласта, а размер складки в поперечном сечении составлял примерно половину длины лавы (110–120 м). Западной надрабатывающей лавой так же было встречено тектоническое нарушение в виде поперечной антиклинальной складки, осложненной отдельными малоамплитудными (0,2–0,4 м) разрывами. Эта нарушенная зона располагалась на расстоянии от разрезной печи 500–600 м, размер по прости-

ранию 350–400 м. Расчеты прогнозной метанообильности, при работе лавы в указанной нарушенной зоне, показали 47 % отклонение от фактической метанообильности. В первом и втором случаях в качестве лавы-аналога была принята Западная надрабатывающая лава, которая отрабатывала ненарушенный участок длиной 540 м в течение 20 месяцев 1999–2000 гг.

Анализ полученных данных в условиях отработки пласта k_5^H шахты им. Н. П. Баракова показал следующее. Метановыделение в выработки выемочных участков коренных лав вне зависимости от применяемой системы разработки (сплошная или столбовая), при прочих равных условиях, одинаково, за исключением работы лав в нарушенных зонах. В последнем случае метановыделение в 1,5–2,0 раза выше, чем в тектонически спокойных зонах. При работе лав, выемочные поля которых примыкают к выработанному пространству коренной лавы, метановыделение в выработки на 28–38 % выше. При отработке выемочных полей последующих лав метановыделение в выработки добычных участков снижается до уровня, который наблюдался для условий работы коренных лав.

Аналогичные расчеты были проведены для небольших участков выемочных полей, которые образовались за счет более короткого выемочного столба 1 Северной лавы, по сравнению с остальными. Они подтвердили установленные ранее закономерности.

На шахте «Самсоновская-Западная» пласт k_2^H отрабатывался длинными столбами по простиранию. Первой в западном крыле отрабатывала пласт 2 Западная лава. Изменение природной метаноносности с глубиной учитывалось соответствующим коэффициентом. Коэффициент системы разработки принимался равным $k_{c.p.} = 1$, так как системы разработки одинаковы. Результаты расчетов показали, что прогнозная метанообильность исследуемых лав, в одних случаях на 15–40 % ниже фактической, в других наблюдается удовлетворительное их схождение.

На шахте «Белореченская» получена удовлетворительная сходимость прогнозных значений метанообильности с фактическими. Исследуемые лавы, за исключением 6 Западной, являлись коренными, система разработки столбовая. Выемочное поле 6 Западной лавы примыкало со стороны вентиляционного горизонта к полю 5 Западной лавы. В этом случае расчет показал, что метановыделение в выработки коренной лавы ниже по сравнению с лавой, выемочное поле которой примыкает к выработанному пространству коренной лавы.

В итоге анализ результатов сопоставления прогнозных величин метанообильности с фактическими в различных условиях разработки пластов показал, что использование коэффициента $k_{c.p.}$ в расчетах прогнозной метанообильности выработок выемочных участков не представляется возможным в таком качестве как предлагается в Руководстве. Численное значение этого коэффициента, в соответствии с Руководством, рассчитывается исходя из образования в плоскости разрабатываемого пласта условного пояса газового дренирования, ширина которого определяется степенью метаморфизма угля. Использование $k_{c.p.}$ для учета изменения системы разработки возможно только при расчете ожидаемой метанообильности очистной выработки, метановыделение в которую происходит из разрабатываемого пласта. В газовом балансе выемочного участка значительный удельный вес (до 70 %) составляет метановыделение из подрабатываемого массива. Уровень метановыделения из этого источника при прочих равных условиях определяется геомеханическим состоянием массива, нарушенного очистными работами [9]. Влияние условий примыкания проектируемой лавы к ранее отработанному пространству и очередности ее работы на метанообильность выработок выемочного участка необходимо учитывать с помощью коэффициента, числовые значения которого должны устанавливаться на основе фактических данных в различных условиях разработки пластов. Подобный коэффициент (k_c) был введен в действующий нормативный документ [10] и с его помощью учитывалось влияние системы разработки на метановыделение из пластов-спутников. При этом допускалось, что в пластах-спутниках, по аналогии с разрабатываемым пластом, образуются условные зоны дренирования. Величина поправочного коэффициента в отличие от аналогичного коэффициента для условий разрабатываемого пласта зависела от наличия возле

действующей лавы нетронутого массива кровли или подработанного очистными работами ранее действующих лав. Физический смысл коэффициента заключается в том, что в условиях работы коренной лавы пласты-спутники в подработываемом массиве дегазируются как над всей площадью выработанного пространства, так и в нетронутым массиве над поясом газового дренирования шириной $b_{з.д.}$ вокруг выработанного пространства. В итоге метанообильность выработок выемочного участка коренной лавы при прочих равных условиях должна быть выше, чем в смежных лавах. В действительности, как показали результаты исследований, метанообильность выработок коренных лав может быть ниже или равной таковой в смежных лавах в зависимости от геологических условий залегания пластов.

Важным вопросом в прогнозировании метановыделения в горные выработки является вид математической модели, принятой для расчета метанообильности с учетом изменяющихся параметров очистного забоя — длины лавы и добычи угля. Необходимое условие при этом — принятая модель должна адекватно описывать процесс метановыделения и быть пригодной для инженерных расчетов.

Результаты исследований, проведенных в разные годы в различных горно-геологических и технологических условиях эксплуатации пластов, и опыт работы высокометанообильных шахт показали, что в реальном времени ведения очистных работ при временной их остановке величина метановыделения не падает до нуля, а сохраняется длительное время на определенном уровне, который определяется конкретными условиями разработки пластов.

Это связано с тем, что углепородный массив, отдающий метан при ведении очистных работ, является инерционной системой, и его реакция на изменение темпа выемки угля проявляется с большим запозданием. Определенной скорости подвигания лавы соответствует свой характер сдвижения пород кровли, который не устанавливается сразу, а лишь со сдвигом во времени.

Из формулы (1) следует, что при остановке очистных работ на участке ($A \rightarrow 0$, $v \rightarrow 0$) его метановыделение становится равным нулю, чего в действительности не наблюдается. Разумеется, приведенная формула является обобщением эмпирических данных и применима только в ограниченном интервале изменения добычи, но величина интервала при этом не указывается.

Формула (1) является результатом преобразования общеизвестной формулы, приведенной в [10], используемой для расчета относительной метанообильности проектируемого этажа с учетом изменений горнотехнических условий, а именно, добычи угля и длины лавы.

$$q_p = q_\phi \left(\frac{\ell_{оч.р.}}{\ell_{оч.ф.}} \right)^{0,4} \left(\frac{A_\phi}{A_p} \right)^{0,4}, \text{ м}^3/\text{т д.} \quad (2)$$

Учитывая, что $q = \frac{I}{A}$, то уравнение (2) запишем в следующем виде

$$\frac{I_p}{A_p} = \frac{I_\phi}{A_\phi} \left(\frac{\ell_{оч.р.}}{\ell_{оч.ф.}} \right)^{0,4} \left(\frac{A_\phi}{A_p} \right)^{0,4}, \text{ м}^3/\text{т.д.}, \quad (3)$$

после преобразования получим известную формулу для расчета абсолютной метанообильности при изменении параметров очистного забоя

$$I_p = I_\phi \left(\frac{\ell_{оч.р.}}{\ell_{оч.ф.}} \right)^{0,4} \left(\frac{A_p}{A_\phi} \right)^{0,6}, \text{ м}^3/\text{мин.} \quad (4)$$

Следовательно, математическая формула зависимости метанообильности выработок от нагрузки на лаву, заложенная в расчетах [1], не логична, не удобна для расчетов и требу-

ется найти равноценную ей формулу со свободным членом, равным величине метановыделения при временно остановленных работах по добыче в лаве.

Приняв, что длина лавы, система разработки и природная метаноносность не изменяются, преобразуем уравнение (1) следующим образом

$$\frac{I_p}{I_\phi} = \left(\frac{A_p}{A_\phi} \right)^{0.6} \quad (5)$$

Графически эта зависимость представлена на рисунке 1, а штриховой линией и в диапазоне относительных изменений добычи угля $0,5 \leq \frac{A_p}{A_\phi} \leq 2$ этот график практически не отличается от прямой линии, описывающейся уравнением

$$\frac{I_p}{I_\phi} = 0,42 + 0,58 \frac{A_p}{A_\phi}, \quad (6)$$

тогда метанообильность участка примет вид

$$I_p = I_\phi \left(0,42 + 0,58 \frac{A_p}{A_\phi} \right), \text{ м}^3/\text{мин.} \quad (7)$$

Линейные зависимости с такими же значениями числовых коэффициентов были получены нами при обработке фактических данных по метанообильности выемочных участков и добыче угля в различных районах Донецкого, Львовско-Волынского и Кузнецкого бассейнов (рис. 3, 4), причем, коэффициенты корреляции равнялись 0,7–0,8.

Отсюда можно сделать вывод, что зависимость (7) по точности равноценна формуле (1) из [1], но при отсутствии добычи угля метановыделение на выемочном участке не равно нулю и линейная зависимость метанообильности от добычи является генеральной и подтверждается по ряду бассейнов.

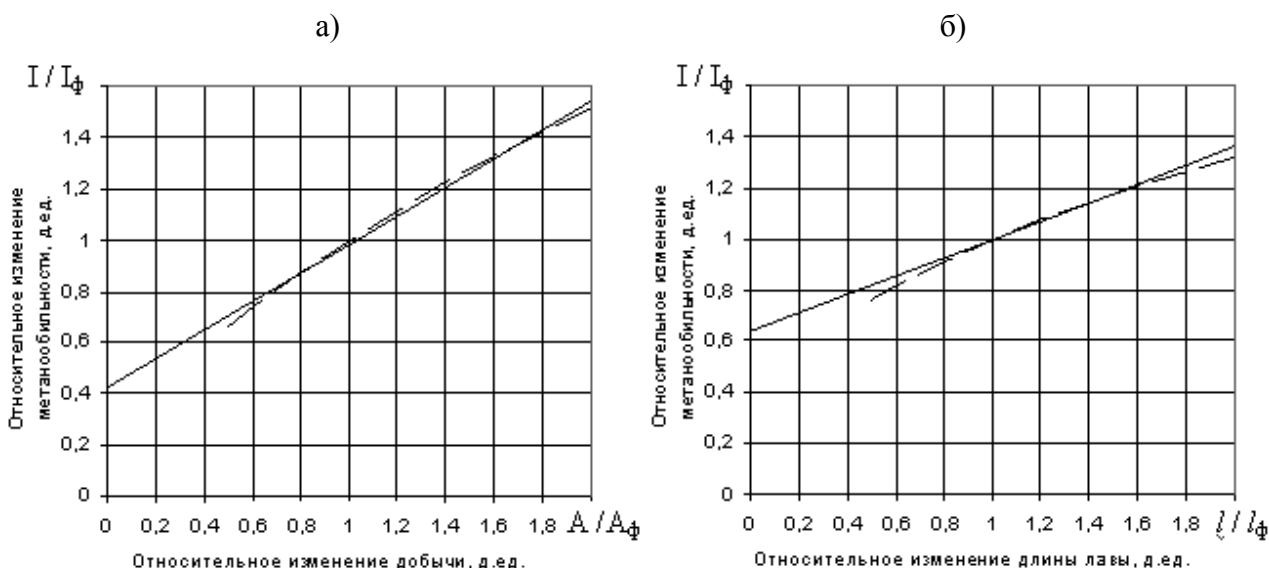


Рисунок 1 — Зависимости метанообильности выработок участка от добычи (а) и длины лавы (б) по формуле «Руководства» и их линейаризация [1]

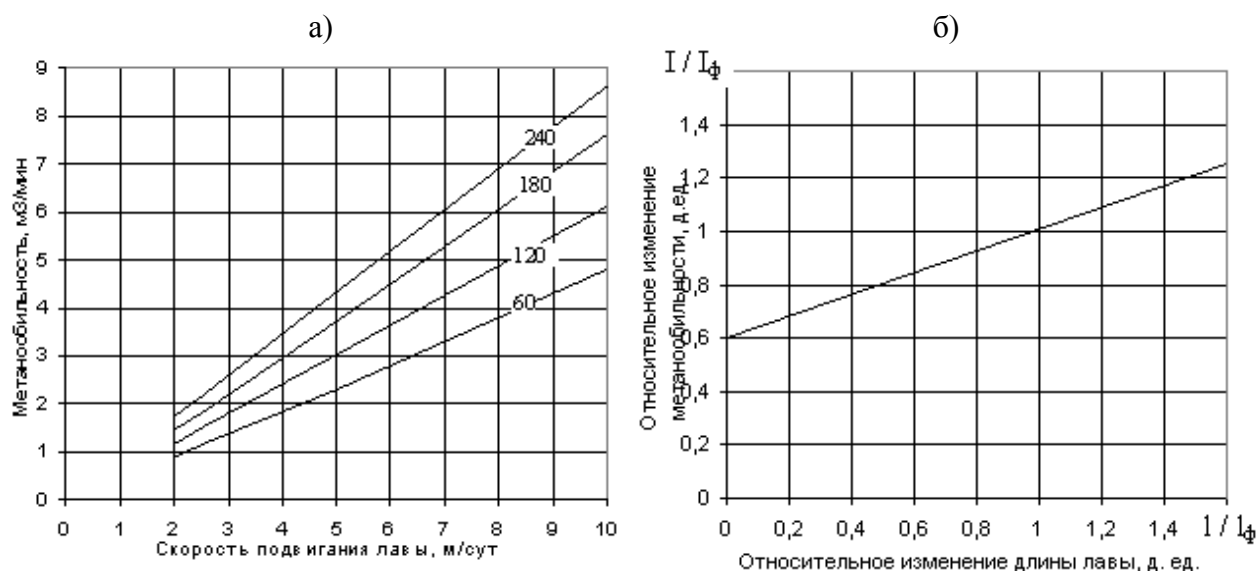


Рисунок 2 — Зависимость метанообильности выработок участка от скорости подвигания лавы при изменении ее длины (60–240 м) (а); и от длины лавы (б), в условиях Кузнецкого бассейна [8]

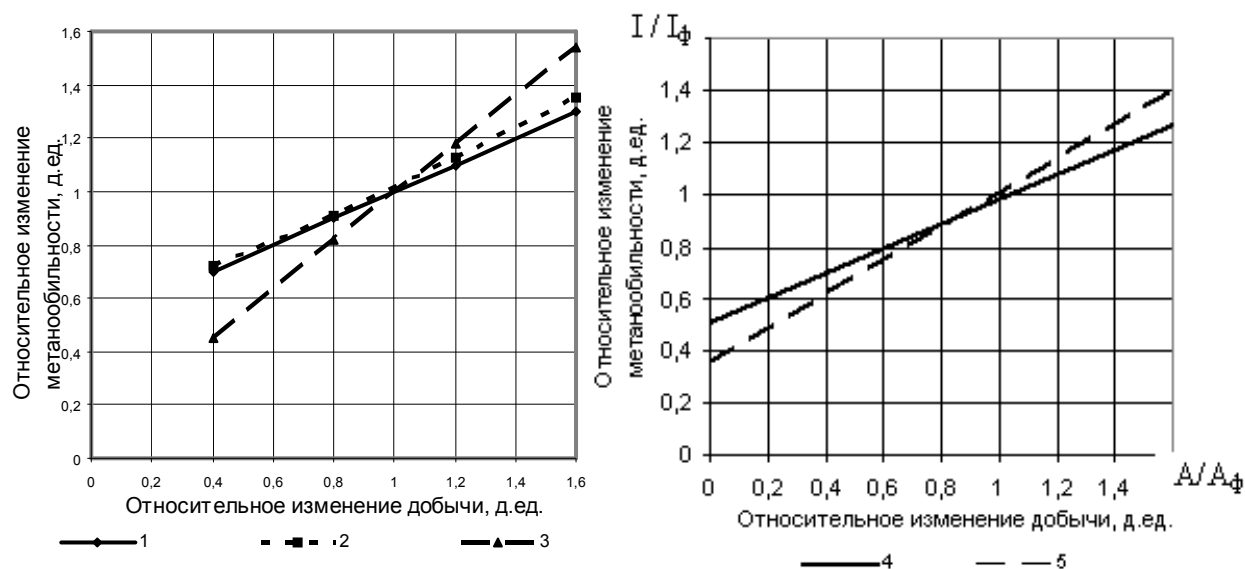


Рисунок 3 — Зависимость метанообильности выработок участка от добычи угля:
 1) ш. «Краснолиманская» [5]; 2) ш. им. газеты «Известия» (фактические данные);
 3) ш. им. газеты «Известия» [6]; 4) ш. им. Н. П. Баракова; 5) ш. «Самсоновская-Западная»

Аналогичным образом была линеаризована зависимость относительных изменений метанообильности от относительного изменения длины лавы. Была получена зависимость вида (рис. 1, б)

$$I_p = I_\phi \left(0,61 + 0,39 \frac{\ell_{оч.p}}{\ell_{оч.ф}} \right), \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (8)$$

Для подтверждения полученных результатов нами были использованы данные аналитических расчетов, приведенные в работе [8] для условий Кузнецкого бассейна, полученная зависимость имеет такой же вид (рис. 2).

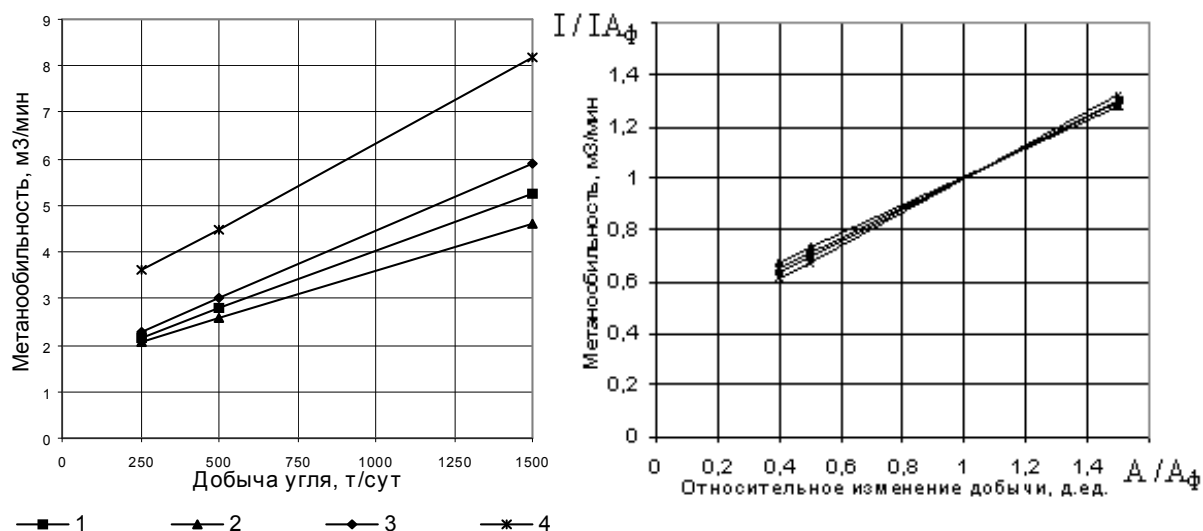


Рисунок 4 — Зависимость метанообильности участков от добычи для некоторых шахтопластов Львовско-Волинского бассейна [9]:

- 1) ш. «Великомостовская» № 4 пл. n₈^в; 2) ш. «Великомостовская» № 4 пл. n₇^н;
- 3) ш. «Великомостовская» № 6 пл. n₇^н; 4) ш. «Великомостовская» № 4 пл. n₈^в

Формула для расчета прогнозной метанообильности с учетом изменений длины лавы и нагрузки имеет следующий вид

$$I_p = I_\phi \left(0,42 + 0,58 \frac{A_p}{A_\phi} \right) \left(0,61 + 0,39 \frac{l_{оч.p}}{l_{оч.ф}} \right), \text{ м}^3/\text{мин.} \quad (9)$$

Метанообильность выработок выемочных участков при отработке пласта в пределах тектонически нарушенных зон повышается в 1,2–2,0 раза по сравнению с ненарушенными участками. Степень превышения метанообильности добычных участков в зонах нарушений, в основном, зависит от типа тектонического нарушения, интенсивности развития нарушений и размеров нарушенных участков. При прогнозе ожидаемой метанообильности для учета влияния нарушенности на метанообильность выемочного участка в расчетную формулу (9) необходимо вводить коэффициент нарушенности (k_n), числовые значения которого должны устанавливаться в каждом конкретном случае в зависимости от условий разработки.

При прогнозе ожидаемой метанообильности выемочного участка учет влияния условий отработки выемочных полей (столбов) следует проводить в зависимости от очередности их отработки по отношению к коренной лаве с учетом литологического состава пород массива кровли и степени метаморфизма. Для этого в формулу (9) предлагается ввести коэффициент, который учитывает очередность отработки выемочных полей по отношению к коренной лаве (k_c^1). Влияние литологического состава пород предлагается учитывать коэффициентом (k_l).

Таким образом, предложена математическая модель прогноза метанообильности очистного забоя и выемочного участка с учетом изменяющихся условий отработки пластов.

Ожидаемое (прогнозное) метановыделение в очистной выработке определяется так

$$I_{оч} = I_{оч\phi} \left(0,62 + 0,38 \frac{l_{оч.p}}{l_{оч.ф}} \right) \cdot \left(0,42 + 0,58 \frac{A_p}{A_\phi} \right) k_{с.p.} k_{г.p.}, \text{ м}^3/\text{мин.} \quad (10)$$

на выемочном участке следующим образом

$$I_{уч} = I_{очф} \left(0,62 + 0,38 \frac{l_{оч.р.}}{l_{оч.ф.}} \right) \cdot \left(0,42 + 0,58 \frac{A_p}{A_{ф.}} \right) k_{с.р.} k_{г.р.} + \\ + I_{в.н.} \left(0,62 + 0,38 \frac{l_{оч.р.}}{l_{оч.ф.}} \right) \cdot \left(0,42 + 0,58 \frac{A_p}{A_{ф.}} \right) k_n k_{с.р.}^1 k_l k_{г.р.}, \quad (11)$$

где $I_{в.н.}$ — метанообильность выработанного пространства, м³/мин.

При применении дегазации: выработанного пространства — $I_{в.н.}^1 = I_{в.н.} + I_{г.отв.}$; под- и надрабатываемых толщ различными видами скважинной дегазации — $I_{в.н.}^1 = I_{в.н.} + 0,85 I_{под.дег.} + 0,45 I_{нов.дег.}$.

Результаты апробации математической модели прогноза метанообильности горных выработок, применительно к условиям работы шахт Краснодонского и Луганского районов Донбасса, показали удовлетворительную сходимости прогнозных величин метанообильности с фактическими (МАРЕ — среднеабсолютная процентная погрешность не более 10 %).

Выводы. Предложенная математическая модель прогноза метанообильности очистного забоя и выемочного участка с учетом изменяющихся условий отработки пластов адекватно описывает процесс метановыделения. Тектоническая нарушенность вмещающего массива существенно влияет на уровень метановыделения, что необходимо учитывать при прогнозе метанообильности посредством введения коэффициента, который численно равен превышению метанообильности в нарушенных зонах по сравнению с ненарушенными участками пласта. Система разработки пласта может оказывать заметное влияние только на метанообильность очистной выработки. На метанообильность выемочного участка, где основным источником газовой выделение являются под- и надрабатываемый массивы, решающее влияние оказывает очередность отработки выемочных полей по отношению к коренной лаве, вид газовых коллекторов в кровле, степень метаморфизма пластов. Прогноз метанообильности с учетом полученных закономерностей повышает точность определения величины ожидаемой метанообильности выработок добычного участка проектируемой лавы.

Список литературы

1. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — К. : Основа, 1994. — С.3–53.
2. Денисенко, В. П. Совершенствование методики прогнозирования метанообильности очистных выработок в условиях глубоких горизонтов шахт (на примере Северо-Западного Донбасса) / В. П. Денисенко // Сб. науч. тр. Донб. гор.-мет. ин-та. — Алчевск : ДГМИ, 2001. — С. 100–115.
3. Кузьмин, Д. В. О метанообильности выемочных участков в зонах геологических нарушений / Д. В. Кузьмин, С. Н. Недвига // Уголь Украины. — 1988. — № 6. — С. 32–33.
4. Денисенко, В. П. О метанообильности очистных выработок в зонах малоамплитудной нарушенности пластов / В. П. Денисенко // Сборник научных трудов. — Алчевск : ДГМИ, 1998. — С. 61–64.
5. Мирошников, С. И. К исследованию влияния интенсивности очистной выемки на метановыделение / С. И. Мирошников, И. Ф. Ярембаш // Разработка месторождений полезных ископаемых : Республиканский межведомственный науч.-техн. сб. — К. : Техника, 1971. — Вып. 25. — С. 23–275.
6. Антощенко, Н. И. О точности применяемых методов прогноза газовой выделение при отработке газоносных угольных пластов / Н. И. Антощенко, С. Л. Сятковский // Сб. науч. тр. МакНИИ. — Макеевка, 2006. — № 18. — С. 34–45.
7. Тарасов, Б. Г. Газовый барьер угольных шахт / Б. Г. Тарасов, В. А. Колмаков. — М. : Недра, 1978. — 200 с.
8. Пигида, Г. Л. Об оценке показателя относительной метанообильности участков шахт Львовско-Волынского бассейна / Г. Л. Пигида, В. М. Бережной, В. М. Смаль // Разработка месторождений полезных ископаемых : Республиканский межведомственный науч.-техн. сб. — К. : Техника, 1971. — Вып. 25. — С. 32–36.

9. Звягильский, Е. Л. Исследование процесса перераспределения метана вокруг движущегося очистного забоя / Е. Л. Звягильский, Б. В. Бокий, В. В. Назимко. — Донецк : Норл-Пресс, 2005. — 193 с.
10. Дополнения к «Руководству по проектированию вентиляции угольных шахт». — М. : Недра, 1981. — С.11–49.