

УДК 622.33.013.3

**ЦИКЛИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ
В ДЛИННОМ ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ ШАХТЫ**

А. А. Ордин¹, А. М. Тимошенко², А. А. Метельков³, С. А. Коленчук³

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ordin@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

²*ОАО “НЦ ВостНИИ” ул. Институтская, 3, г. Кемерово, 650002, Россия*

³*ЗАО “Гипроуголь”, ул. Трикотажная, 41а, 630015, г. Новосибирск, Россия*

Установлены аналитические зависимости от длины лавы фонового уровня метановыделения из угольного пласта, выработанного пространства и вмещающих боковых пород в очистном забое в ремонтную смену. Приведены результаты фактических замеров метановыделения средствами аэрогазового контроля на шахте “Котинская” и концентрации метана в очистном забое шахты “Костромовская” ОАО “Белон”. Обоснованы теоретические зависимости циклического изменения во времени метановыделения в очистном забое угольной шахты в рабочую смену.

Шахта, очистной забой, длина лавы, метановыделение, концентрация метана, циклические закономерности

Фактические объемы метановыделения на угольных шахтах России составляют в среднем 18–20 м³/т. В Кузбассе 40 из 66 действующих в настоящее время шахт разрабатывают угольные пласты с природной метаноносностью более 15 м³/т и относятся к сверхкатегорным по газу. По этой причине эффективность проветривания высокопроизводительных очистных забоев часто является неудовлетворительной, о чем свидетельствует большое количество загазований в очистных и подготовительных выработках — 840–890 случаев в год [1].

Методики и руководства по проектированию вентиляции угольных шахт имеют определенные недостатки [2–5]. В них не учитывается турбулентность и неравномерность движения потока воздуха в лаве по ее контуру и длине, фракционный состав отбитого угля, утечки воздуха из лавы в выработанное пространство. Сравнительный анализ фактических показателей и проектных оценок метановыделения в высокопроизводительных очистных забоях показывает их существенное различие [6–10].

Изучены следующие основные закономерности динамики воздушного потока и метановыделения в длинном очистном забое шахты:

— режим движения воздушного потока является турбулентным и неравномерным, максимальная скорость достигается в средней точке сечения лавы и минимальная, близкая к нулю, — в граничных точках сечения по контуру лавы вследствие вязкого трения пограничных слоев воздуха [4];

— в соответствии с неравномерным распределением скорости воздушного потока концентрация метана по контуру лавы распределена также неравномерно, достигая максимума в верхней части груди забоя [4];

— концентрация метана возрастает вдоль лавы по закону, близкому к линейному, но в конце лавы возможен ее более быстрый рост, обусловленный выходом метана из выработанного пространства [4];

— при недостаточно высокой скорости движения воздушного потока в верхней части очистного забоя могут создаваться слоевые скопления метана повышенной концентрации [4];

— из-за утечек воздуха в выработанное пространство через секции механизированной крепи скорость воздушной струи линейно уменьшается от начала к концу лавы и, как следствие, нелинейно, по гиперболической зависимости возрастает концентрация метана [6];

— после обрушения кровли часть воздушной струи вместе с метаном может поступать из выработанного пространства в очистной забой через секции механизированной крепи, дополнительно увеличивая в конце лавы концентрацию метана;

— очистной комбайн создает подвижное аэродинамическое сопротивление воздушной струе, значительно уменьшая площадь сечения лавы в свету, увеличивая скорость и утечки воздушного потока через секции механизированной крепи в выработанное пространство. Эта область максимальных утечек воздуха через секции крепи является подвижной и перемещается вместе с очистным комбайном;

— метановыделение из отбитого угля, транспортируемого скребковым конвейером и лежащего на почве пласта, вследствие движения комбайна носит циклический характер, периодически создавая пики концентрации метана [10];

— максимальное метановыделение в лаве происходит при разрушении угля шнековым очистным комбайном; концентрация метана достигает максимума над шнеками комбайна, экспоненциально снижаясь при удалении от него. Эта область максимальной концентрации метана является подвижной и перемещается по лаве со скоростью подачи очистного комбайна [4];

— поскольку сечение лавы в свету меньше сечения конвейерного и вентиляционного штреков, возникают скачки в скорости воздушного потока на входящей и исходящей струях воздуха в очистном забое [4];

— по существующим правилам безопасности ограничений на скорость воздушного потока в очистном забое (не более 4 м/с) и концентрацию метана на исходящей струе (не более 1 %) длина и производительность очистного забоя ограничиваются по газовому фактору [4–6, 11].

Таким образом, видно, что характеристика движения воздушного потока и метановыделения в очистном забое достаточно сложна для ее описания дифференциальными уравнениями. В настоящее время эта задача математического моделирования аэрогазодинамических процессов в очистном забое в полном объеме не только не решена, но даже не поставлена.

ФОНОВЫЙ УРОВЕНЬ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ

В ремонтную смену метан выделяется из обнаженного угольного пласта, боковых пород кровли и почвы пласта и выработанного пространства, создавая фоновый уровень метановыделения в очистном забое. Газовыделение в призабойной зоне угольного пласта при перепадах давления газа до 1 МПа происходит по линейному закону Дарси в режиме фильтрации со скоростью от $2 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ см/с [12]. Газопроницаемость пород кровли и почвы в 3–5 раз ниже, чем проницаемость угольного пласта, соответственно в 3–5 раз снижается и скорость фильтрации метана через боковые вмещающие породы [11].

Удельное газовыделение с 1 м^2 обнаженной поверхности угольного пласта снижается со временем по гиперболической зависимости [11]:

$$q = \frac{q_0}{\sqrt{t}}, \quad (1)$$

где q , q_0 — текущее и начальное газовыделение, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$; t — безразмерное время, прошедшее с начала обнажения поверхности пласта.

В интервале времени от 1 ч до 3 мес получена также экспериментальная формула для расчета газовыделения из угольного пласта [11]:

$$q = \frac{a}{t^\varphi}, \quad (2)$$

где $a = 0.0037 - 3.017$, $\varphi = 0.505 - 0.836$ — параметры для разных пластов угля.

К недостаткам этих зависимостей следует отнести большой разброс значений параметра a (в 1000 раз!) при использовании формулы (2) и безразмерность времени в (1).

Выделим элементарный отрезок длиной dx по периметру лавы в произвольном поперечном сечении (рис. 1). Суммарный приток метана ($\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{мин})$) в этот отрезок лавы от указанных источников в ремонтную смену определим с использованием закона Дарси о линейной фильтрации:

$$dQ_f = \sum_{i=1}^n \delta S_i \cdot q_i = (mq_{\text{пл}} + \delta h \cdot q_{\text{вп}} + bq_k + bq_{\text{п}}) dx, \quad (3)$$

где $n = 4$ — количество источников метана; δS_i — элементарная площадь поверхности i -го источника шириной dx , м^2 ; q_i — скорость фильтрации метана из i -го источника, $\text{м}/\text{мин}$; m — мощность пласта, м ; b — ширина лавы, м ; δh — удельная ширина зазоров между секциями крепи, приходящаяся на 1 м лавы [6]; $q_{\text{пл}}$, $q_{\text{вп}}$, q_k , $q_{\text{п}}$ — средние скорости фильтрации метана соответственно из обнаженной поверхности пласта, выработанного пространства, кровли и почвы пласта, $\text{м}/\text{мин}$; x — длина лавы, м .

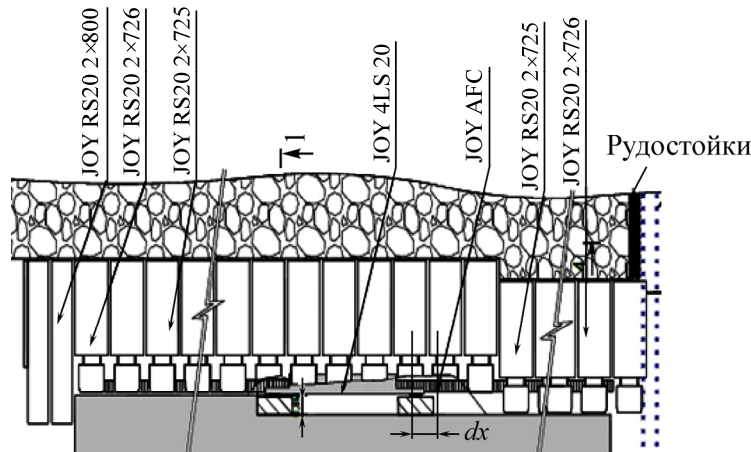


Рис. 1. Схема очистного забоя для расчета фонового уровня метановыделения

Суммарный фоновый уровень метановыделения ($\text{м}^3/\text{мин}$) в очистном забое в ремонтную смену линейно зависит от его длины L :

$$Q_f = \int_0^L (mq_{\text{пл}} + \delta h \cdot q_{\text{вп}} + bq_k + bq_{\text{п}}) dx = (mq_{\text{пл}} + \delta h \cdot q_{\text{вп}} + bq_k + bq_{\text{п}}) L. \quad (4)$$

Однако концентрация метана на исходящей струе лавы с увеличением длины лавы возрастает нелинейно из-за утечек воздуха в выработанное пространство через секции механизированной крепи [6]. Рассмотрим эту зависимость более подробно.

Количество свежего воздуха ($\text{м}^3/\text{мин}$) для проветривания очистного забоя зависит от утечек или притока воздуха через секции механизированной крепи и является функцией от длины лавы:

$$Q_b(L) = 60S_{\text{л}}(v_0 \pm \delta v \cdot L), \quad (5)$$

где $S_{\text{л}}$ — площадь поперечного сечения лавы в свету, м^2 ; v_0 — средняя скорость движения воздуха на входящей струе, $\text{м}/\text{с}$; δv — удельное изменение скорости воздуха на единицу длины лавы, $\text{м}/\text{с}$.

При зависании кровли происходят утечки воздуха в выработанное пространство, соответственно скорость воздуха в лаве снижается. При обрушении кровли возможен приток метано-воздушной смеси из выработанного пространства, обеспечивающий локальное увеличение скорости воздуха в лаве.

Фактические утечки воздуха через секции механизированной крепи снижают эффективность проветривания очистного забоя. Так, для условий шахты “Котинская” количество воздуха для проветривания лавы длиной 230 м, оборудованной механизированной крепью DBT, составляет 2185 м³/мин на входящей струе и 1900 м³/мин на исходящей [12]. Общие утечки воздуха равны 285 м³/мин (13 %). Примерно половина утечек связана с перетоком части свежей струи в выработанное пространство непосредственно из вентиляционного штрека. В этом случае удельные утечки воздуха приближенно составляют 0.6 м³/(м·мин) на 1 м длины лавы и 1.1 м³/мин на каждой секции крепи шириной 1.75 м.

Учет утечек воздуха через секции механизированной крепи существенно изменяет концентрацию метана на исходящей струе воздуха [6]. Суммарные утечки воздуха (м³/мин) в выработанное пространство через секции механизированной крепи находятся с учетом увеличения скорости воздушного потока в лаве вблизи очистного комбайна по следующей зависимости от длины лавы:

$$Q_y(L) = \frac{kv_{\min}n_{\text{co}}mr}{\sin \beta} + \frac{v_{\max}s_c l}{b_c} + \frac{v_{\min}s_c}{b_c} L, \tag{6}$$

где r — ширина захвата очистного комбайна, м; β — угол между ограждением секции крепи и почвой очистной выработки; v_{\min} — минимально допустимая скорость движения струи воздуха вблизи ограждений секций крепи ($v_{\min} = 0.25$ м/с для негазовых (I и II категорий) шахт, $v_{\min} = 0.5$ м/с для газовых шахт, III категории и сверхкатегорных [13]); n_{co} — количество одновременно передвигаемых секций крепи; $k = 1$ — при последовательной передвижке секций; $k = 2$ — при шахматном порядке передвижки; s_c — площадь открытого пространства и зазоров в каждой секции крепи, через которую происходят утечки воздуха в выработанное пространство, м²; b_c — ширина секции крепи, м; l — длина очистного комбайна, м; v_{\max} — максимальная скорость воздуха, определяемая с учетом уменьшения площади сечения лавы в свету вблизи очистного комбайна:

$$v_{\max} = \frac{S_{\text{л}}v_{\text{в}}(X_{\text{к}})}{S_{\text{л}} - S_{\text{к}}}, \tag{7}$$

где $S_{\text{л}}$, $S_{\text{к}}$ — площадь поперечного сечения в свету соответственно лавы и очистного комбайна; $v_{\text{в}}(X_{\text{к}})$ — средняя скорость воздуха вблизи очистного комбайна с текущей координатой $X_{\text{к}}$ его местоположения в лаве.

Таким образом, фактический расход воздуха на исходящей струе лавы, с учетом утечек воздуха через секции механизированной крепи в выработанное пространство, описывается линейной зависимостью от длины лавы:

$$Q(L) = 60 \left(v_{\text{в}}S_{\text{л}} - \frac{kv_{\min}n_{\text{co}}mr}{\sin \beta} - \frac{S_{\text{л}}v_{\text{в}}(X_{\text{к}})s_c l}{(S_{\text{л}} - S_{\text{к}})b_c} - \frac{v_{\min}s_c}{b_c} L \right). \tag{8}$$

Средняя скорость движения струи воздуха (м³/мин) на исходящей струе также линейно убывает с увеличением длины лавы:

$$v_{\text{в}}(L) = \frac{Q(L)}{60S_{\text{л}}} = v_{\text{в}} - \frac{kv_{\min}n_{\text{co}}mr}{S_{\text{л}} \sin \beta} - \frac{v_{\text{в}}(X_{\text{к}})s_c l}{(S_{\text{л}} - S_{\text{к}})b_c} - \frac{v_{\min}s_c}{Sb_c} L. \tag{9}$$

Максимальная концентрация метана (%) на исходящей струе в очистном забое с учетом формулы (4) и утечек воздуха в выработанное пространство вычисляется по формуле

$$c_{\max}(L) = c_0 + \frac{100(mq_{\text{пл}} + \delta h \cdot q_{\text{вп}} + bq_{\text{к}} + bq_{\text{п}})L}{60 \left(v_{\max} S_{\text{л}} - \frac{kv_{\min} n_{\text{со}} mr}{\sin \beta} - \frac{S_{\text{л}} v_{\text{в}} (X_{\text{к}}) s_{\text{с}} l}{(S_{\text{л}} - S_{\text{к}}) b_{\text{с}}} - \frac{v_{\min} s_{\text{с}}}{bc} L \right)}. \quad (10)$$

С учетом утечек или притока воздуха (5) из выработанного пространства формулу (10) можно записать в виде

$$c_{\max}(L) = c_0 + \frac{100(mq_{\text{пл}} + \delta h \cdot q_{\text{вп}} + bq_{\text{к}} + bq_{\text{п}})L}{60 S_{\text{л}} (v_0 \pm \delta v \cdot L)} = c_0 + \frac{q_{\text{м}}}{0.6 S_{\text{л}} \left(\frac{v_0}{L} \pm \delta v \right)} \leq [c], \quad (11)$$

где $q_{\text{м}}$ — суммарный удельный приток метана в лаву из пласта, вмещающих боковых пород и выработанного пространства, $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{мин})$; $[c] = 1\%$ — допустимая концентрация метана на исходящей струе воздуха из лавы.

На рис. 2 приведены гиперболические функции (11) концентрации метана в зависимости от длины лавы и аэродинамической связи с выработанным пространством при следующих исходных данных, близких к условиям лавы № 19-12 шахты “Костромовская”: $c_0 = 0.1\%$, $v_0 = 2 \text{ м/с}$, $S_{\text{л}} = 10 \text{ м}^2$, $\delta v = 0.003 \text{ 1/с}$, $q_{\text{м}} = 0.03 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{мин})$ (при утечках воздуха из лавы), $q_{\text{м}} = 0.05 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{мин})$ (при притоке метановоздушной смеси в лаву из выработанного пространства).

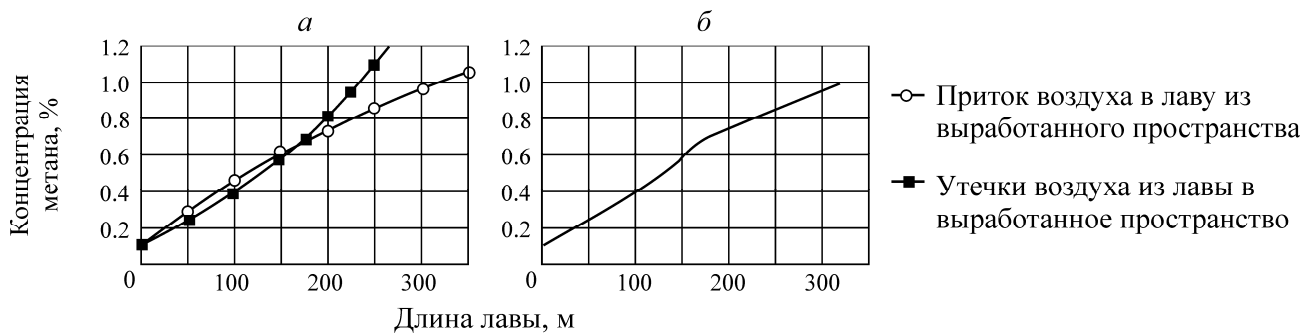


Рис. 2. Зависимость концентрации метана от длины лавы: а — при утечках или притоках воздуха; б — утечки воздуха в начале лавы и притоки метановоздушной смеси в конце лавы

Как видно, концентрация метана на исходящей струе в ремонтную смену в значительной мере обусловлена видом аэродинамической связи с выработанным пространством. При утечках воздуха кривая концентрации метана возрастает более круто, а при притоках в лаву метановоздушной смеси из выработанного пространства эта зависимость более пологая. Возможен также случай, когда в первой половине лавы происходят утечки воздуха, а во второй — приток метановоздушной смеси из выработанного пространства (рис. 2б).

Условия допустимой по правилам безопасности [13] концентрации метана на исходящей струе ($[c] = 1\%$) определяют предельную по газовому фактору длину лавы, которая рассчитывается по формуле

$$[L] \leq \frac{v_0}{\frac{q_{\text{м}}}{0.6 S_{\text{л}} (1 - c_0)} \pm \delta v}. \quad (12)$$

Здесь знак плюс перед δv ставится при утечках воздуха через секции механизированной крепи, а знак минус — при притоках воздуха в лаву из выработанного пространства.

Из (12) следует, что предельная длина лавы по газовому фактору прямо пропорциональна скорости воздуха на входящей струе и нелинейно возрастает с увеличением площади поперечного сечения лавы в свету и уменьшением удельного метановыделения из всех источников, а также зависит от вида аэродинамической связи с выработанным пространством. Так, длина лавы составляет 230 м при утечках воздуха через секции крепи и 320 м — при притоке метано-воздушной смеси из выработанного пространства.

ШАХТНЫЕ ЗАМЕРЫ ПАРАМЕТРОВ АЭРОГАЗОВОГО ПОТОКА В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ

На шахте “Костромовская” проведены замеры в ремонтную смену концентрации метана и скорости воздушного потока в подготовительных выработках и лаве № 12 пласта 19. Основные горно-геологические и технологические данные по лаве № 12 приведены в табл. 1, результаты замеров в точках — в табл. 2.

ТАБЛИЦА 1. Параметры выемочного столба лавы 19-12 шахты “Костромовская”

| Горно-геологические показатели | | Технологические показатели | |
|--|-------|--|-------------|
| Средняя вынимаемая мощность пласта 19, м | 1.94 | Длина лавы, м | 230 |
| Угол падения пласта, град | 5.0 | Длина выемочного столба, м | 1 580 |
| Плотность горной массы, т/м ³ | 1.31 | Тип очистного комбайна | JOY 4LS20 |
| Марка угля | Ж | Тип механизированной крепи | JOY RS2/725 |
| Промышленные запасы угля в выемочном столбе, тыс. т | 1 100 | Тип лавного скребкового конвейера | JOY тип AFC |
| Промышленные запасы угля по чистым угольным пачкам, тыс. т | 707 | Производительность очистного забоя, тыс. т/год | 990.0 |
| Средняя зольность угля, % | 30.6 | Срок отработки выемочного столба, мес | 13 |

ТАБЛИЦА 2. Данные шахтных замеров концентрации метана и скорости движения воздуха в штреках и лаве № 19-12 шахты “Костромовская”

| Место шахтных замеров | Площадь сечения в свету, м ² | Концентрация метана, % | | | Скорость движения воздуха, м/с | | |
|--|---|------------------------|------------|-----------------|--------------------------------|------------|-----------------|
| | | вблизи пласта | в середине | в краевой точке | вблизи пласта | в середине | в краевой точке |
| Конвейерный штрек (входящая струя) | 15.1 | 0.1 | 0.07 | 0.1 | 0.73 | 0.84 | 0.58 |
| Лавы (68-я секция) | 6.5 | 0.33 | 0.23 | 0.36 | 1.77 | 2.15 | 1.4 |
| Вентиляционный штрек (исходящая струя) | 16.1 | 0.46 | 0.45 | 0.46 | 0.32 | 0.78 | 1.51 |

Анализ полученных данных (табл. 2) показывает, что в очистном забое происходит увеличение скорости воздушного потока с 0.84 до 2.15 м/с, вызванное уменьшением площади поперечного сечения лавы в свету более чем в 2 раза. Это, в свою очередь, приводит к турбулентному движению воздушного потока на вентиляционном штреке, где скорость воздуха изменяется в одном и том же сечении от 0.32 до 1.51 м/с. Концентрация метана также возрастает по длине лавы с 0.1 % на входящей струе до 0.46 % на исходящей. Так как замеры проводились в ремонтную смену, то выделение метана в очистном забое происходило главным образом из пласта, выработанного пространства и вмещающих пород кровли и почвы пласта.

В результате обработки данных табл. 2 получены регрессионные зависимости концентрации метана от длины лавы L (рис. 3):

- вблизи пласта:

$$c(L) = 0.1 + \frac{0.68L}{247.3 + 0.827L}, \quad R^2 = 1;$$

- в середине поперечного сечения лавы:

$$c(L) = 0.075 + 0.001L, \quad R^2 = 0.996;$$

- вблизи выработанного пространства:

$$c(L) = 0.1 + \frac{0.67L}{164.63 + 1.14L}, \quad R^2 = 1.$$

Как видно, аналитическая зависимость (11) концентрации метана от длины лавы, полученная теоретически, подтверждается фактическими замерами. Метановыделение в ремонтную смену происходит в основном из пласта и выработанного пространства, о чем свидетельствует увеличение концентрации метана вблизи груди забоя и в секции механизированной крепи вблизи завала (рис. 3б).

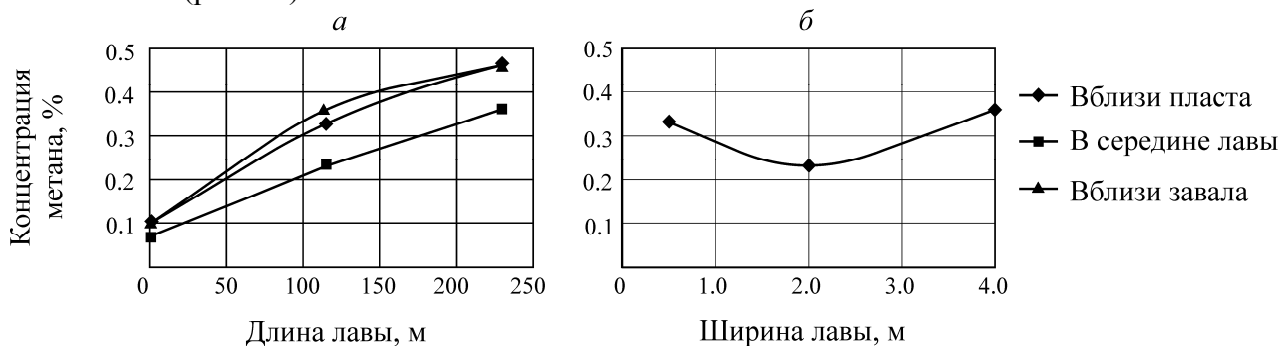


Рис. 3. Зависимость концентрации метана от длины (а) и ширины (б) лавы № 19-12 шахты “Костромовская”

ЦИКЛИЧЕСКОЕ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕ В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ

В рабочую смену к предыдущим четырем источникам метана добавляется метановыделение из отбитого угля при разрушении пласта шнеками комбайна из насыпной массы на лавном скребковом конвейере и почве пласта. Эти источники не являются стационарными. Динамика метановыделения из них носит циклический характер, вызванный переменной массой отбитого угля, что подтверждается фактическими замерами концентрации метана средствами аэрогазового контроля на исходящей струе очистного забоя шахты “Котинская” (рис. 4) [10].

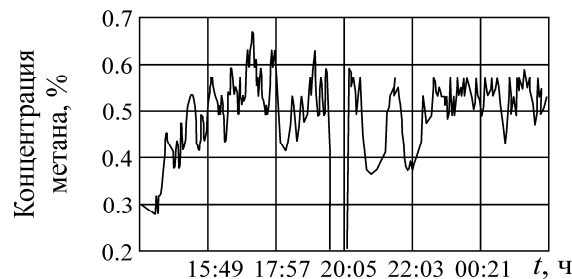


Рис. 4. Замеры средствами аэрогазового контроля концентрации метана на исходящей струе очистного забоя шахты “Котинская”

Закономерности метановыделения связаны в основном с остановками очистного комбайна по техническим и организационным причинам, а также с периодически изменяющимся объемом отбитого угля на скребковом конвейере и почве пласта. Количество отбитого угля,

выгружаемого очистным комбайном на лавный скребковый конвейер и остающегося на почве пласта, зависит от скорости его погрузки, пропускной способности скребкового конвейера, схемы работы очистного комбайна (односторонней или челноковой) и длины лавы.

Существующие методики не дают возможности подробно раскрыть характер циклического метановыделения из насыпной массы угля на скребковом конвейере и почве пласта. Этот недостаток весьма значителен, так как абсолютное метановыделение из всех источников в очистном забое в некоторые моменты времени может превышать допускаемый уровень в 1 %, учитывая цикличность выделения метана из отбитого угля.

Газовыделение из отбитого угля характеризуется уравнениями диффузии из микропор и фильтрации из макропор, трещин и свободного пространства в насыпной массе. В [12] показано, что газовыделение из отбитого угля обратно пропорционально квадрату радиуса R сферической частицы и зависит от эффективного коэффициента диффузии и фильтрации D_e , который может проходить через максимум, а затем снижаться по мере заполнения сорбционного пространства:

$$r = \frac{\pi^2 D_e t_{0.5} q}{R^2 a},$$

здесь $t_{0.5}$ — период десорбции половины сорбированного газа; a — сорбционная емкость угля; q — содержание свободного газа в порах.

Рассмотрим зависимости метановыделения из отбитого угля для наиболее распространенной схемы односторонней выемки угля комбайном при его движении снизу вверх и зачисткой оставшегося угля на почве пласта при движении комбайна сверху вниз.

Производительность лавного скребкового конвейера (т/мин) при встречном движении очистного комбайна находится по формуле [14]:

$$q_c = \gamma m r \psi \frac{v_n v_c}{v_c + v_n}, \tag{13}$$

где γ — насыпная плотность горной массы на конвейере, т/м³; m — вынимаемая мощность пласта, м; r — ширина захвата комбайна, м; $\psi = 0.7 - 0.8$ — коэффициент заполнения рештаков конвейера для горной массы; v_n, v_c — соответственно рабочая скорость подачи комбайна и скорость скребкового конвейера, м/мин.

Время выемки одной “ленты” угля при движении комбайна вверх по лаве рассчитывается следующим образом [9]:

$$T_1 = \frac{L}{v_n} = \frac{L(fP \cos \alpha + P \sin \alpha + S_i^{cp} D n_3 K_{от} K_\alpha K_b K_{з.р} K_{ф.р})}{30 N \eta n_{1л} K_\Pi}, \tag{14}$$

здесь L — длина лавы, м; P — вес комбайна, кН; f — коэффициент трения скольжения между комбайном и конвейером; N — мощность электродвигателей комбайна, кВт; α — угол падения пласта, град; η — КПД редуктора исполнительного органа; $n_{1л}$ — количество резцов в одной линии резания; K_Π — коэффициент, учитывающий затраты мощности на перемещение комбайна; D — диаметр шнеков комбайна, м; n_3 — количество резцов, разрушающих забой одновременно; $K_{от}$ — коэффициент отжима, учитывающий уменьшение сил резания вследствие горного давления; $K_\alpha, K_b, K_{з.р}, K_{ф.р}$ — коэффициенты, соответственно учитывающие угол резания, ширину резца, затупление и форму резцов; S_i^{cp} — средневзвешенная сопротивляемость пласта резанию, кН/м.

За это время с учетом (13) скребковый конвейер пропускает следующее количество угля:

$$V_1 = q_c T_1 = \frac{q_c L}{v_n} = \gamma m r \psi \frac{v_c L}{v_c + v_n}. \tag{15}$$

Количество отбитого угля, находящегося на скребковом конвейере, изменяется от нуля до максимального значения, когда очистной комбайн доходит до вентиляционного штрека и скребковый конвейер полностью заполнен углем:

$$V_{\max} = F\gamma\psi k(\alpha)L = bh\gamma\psi k(\alpha)L, \quad (16)$$

где F — площадь поперечного сечения горной массы на конвейере, m^2 ; b — ширина рештака, m ; $h = (0.25 - 0.3)b$ — высота рештака [14], m ; $\psi = 0.7 - 0.8$ — коэффициент заполнения рештаков конвейера для плохосыпучей горной массы; $k(\alpha)$ — коэффициент использования желоба рештаков, учитывающий уменьшение объема горной массы при увеличении угла наклона (α , град) конвейера или угла падения пласта, определяемый по регрессионной зависимости с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0.991$:

$$k(\alpha) = -0.0002\alpha^2 - 0.0006\alpha + 0.75. \quad (17)$$

Подставляя (17) в (16) и проведя преобразования, получим:

$$V_{\max} = 0.225b^2\gamma(-0.0002\alpha^2 - 0.0006\alpha + 0.75)L. \quad (18)$$

Этот объем угля накапливается на скребковом конвейере в конце периода (14) выемки одной ленты, а скачивается конвейером за время

$$T_2 = \frac{L}{v_c}. \quad (19)$$

Количество угля, оставшегося в лаве на почве пласта после выемки одной ленты, рассчитывается с учетом объема угля (15), скачиваемого конвейером за время (14), и максимального объема угля на конвейере (17):

$$V_2 = \gamma m L r - V_1 - V_{\max} = \gamma m L r \left(1 - \frac{v_c \psi}{v_c + v_n} \right) - 0.225b^2\gamma L (-0.0002\alpha^2 - 0.0006\alpha + 0.75). \quad (20)$$

Далее очистной комбайн выполняет концевые операции в лаве, связанные с зарубкой и передвижкой хвостовой части скребкового конвейера. Время, затрачиваемое на концевые операции, находится по формуле [8]:

$$T_3 = \frac{k_y L_k}{v_k},$$

где $k_y = 1.0 - 1.3$ — коэффициент организации и условий труда; $L_k = 15 - 20$ м — длина косого заезда; $v_k = 15 - 20$ — скорость подачи комбайна при косом заезде, m/min .

Далее очистной комбайн начинает движение сверху вниз, от вентиляционного штрека к конвейерному, и зачищает почву пласта. Время на эту операцию составляет

$$T_4 = \frac{L}{0.85v_1},$$

где v_1 — маневровая скорость движения комбайна, m/min .

Таким образом, общее время одного цикла по выемке ленты и зачистке почвы пласта при односторонней схеме работы комбайна

$$T = \sum_{i=1}^4 T_i = \frac{L}{v_{\Pi}} + \frac{L}{v_c} + \frac{k_y L_k}{v_k} + \frac{L}{0.85v_1}. \quad (21)$$

Далее цикл повторяется. Соответственно циклическому характеру грузопотока угля в лаве изменяется количество метана, выделяемого из отбитого угля. Максимальное его количество из угля, находящегося на лавном скребковом конвейере и почве пласта, определяется по формуле

$$Q_{\max} = v_m (V_{\max} + V_2) = v_m \gamma m r L \left(1 - \frac{v_c \psi}{v_c + v_n} \right), \quad (22)$$

где v_m — скорость фильтрации метана, $m^3/(t \cdot min)$.

Скорость фильтрации метана из отбитого угля зависит от его фракционного состава и снижается во времени:

$$v_m = v_{m0} \exp(-kt),$$

здесь v_{m0} — газовыделение из отбитого угля с начала отбойки, $\text{м}^3/(\text{т}\cdot\text{мин})$; k — коэффициент, зависящий от свойств и размеров фракций раздробленного угля; t — время, прошедшее с момента отбойки угля (для расчета максимального метановыделения принимается $t = T_1$).

Максимальное метановыделение из всех источников в рабочую смену определяется с учетом (4), (21), (22):

$$Q = Q_f + Q_{\max} = (mq_{\text{пл}} + \delta h \cdot q_{\text{вп}} + bq_k + bq_{\text{п}})L + \frac{v_{m0}\gamma mrL}{e^{kT_1}} \left(1 - \frac{v_c \psi}{v_c + v_{\text{п}}}\right). \quad (23)$$

Максимальная концентрация метана на исходящей струе воздуха в рабочую смену достигается, когда очистной комбайн заканчивает выемку угля одной ленты и выходит на вентиляционный штрек, т. е. нелинейно возрастает с увеличением длины лавы:

$$c_{\max}(L) = c_0 + \frac{mq_{\text{пл}} + \delta h \cdot q_{\text{вп}} + bq_k + bq_{\text{п}} + v_{m0} + \gamma mr \left(1 - \frac{v_c \psi}{v_c + v_{\text{п}}}\right)}{e^{kT_1} 0.6 S_{\text{л}} \left(\frac{v_0}{L} \pm \delta v\right)}. \quad (24)$$

На рис. 5 приведены зависимости метановыделения и концентрации метана в очистном забое от времени работы очистного комбайна по выемке двух “лент” угля. Из полученных зависимостей следует, что концентрация метана на исходящей струе воздуха в конце 40-й и 120-й минуты работы очистного забоя достигает максимума и близка к допустимой (1 %).

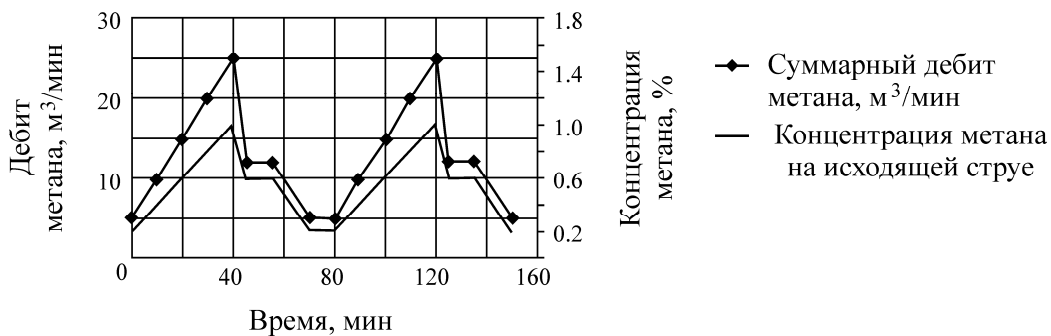


Рис. 5. Циклический характер метановыделения из отбитого угля в лаве в рабочую смену

В некоторых случаях пики концентрации метана могут превышать допустимый уровень и являться причиной снижения производительности очистных забоев. Это необходимо учитывать при проектировании угольных шахт, в частности при обосновании длины и производительности очистных забоев.

ВЫВОДЫ

Установлено, что характер метановыделения в очистном забое зависит не только от природной метаносности угольного пласта и производительности очистного комбайна, но также от вида аэродинамической связи очистного забоя с выработанным пространством, схемы его проветривания (прямоточной или возвратноточной), длины лавы, скорости движения очистного комбайна и схемы выемки угля (односторонней или челноковой), фракционного состава отбитого угля, его объема в виде насыпной массы на скребковом конвейере и почве пласта и скорости удаления из очистного забоя.

Фоновый объем метановыделения и концентрация метана в очистном забое в ремонтную смену имеют гиперболический характер от длины лавы и зависят от вида аэродинамической связи забоя с выработанным пространством, обеспечивающей приток в лаву метановоздушной смеси или утечки воздуха из очистного забоя. Полученные зависимости концентрации метана от длины очистного забоя позволяют определить его допустимую производительность по газовому фактору.

Проведенные средствами аэрогазового контроля замеры концентрации метана в очистном забое шахты “Котинская” продемонстрировали цикличность изменения этого параметра во времени, вызванную неравномерностью движения очистного комбайна и динамикой метановыделения из отбитого угля из-за периодического изменения объема насыпной массы, выгружаемого комбайном на скребковый конвейер и почву пласта. Сравнение теоретических и фактических циклов метановыделения в очистном забое показывает их достаточно близкую расположенность — интервал между пиками концентрации метана составляет от 40 до 80 мин.

Разработанные зависимости позволяют рассчитывать пики концентрации метана в очистном забое и определить его допустимую длину и производительность по газовому фактору.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К. Н., Рубан А. Д., Забурдяев В. С. Особенности метановыделения в высокопроизводительных угольных шахтах // ФТПРПИ. — 2011. — № 4. — С. 76–85.
2. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Проект. — М., 2010.
3. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — Киев, 1994.
4. Рудничная вентиляция: справочник / Сост. Н. Ф. Гращенков, А. Э. Петросян, М. А. Фролов и др.; под ред. К. З. Ушакова. — М.: Недра, 1988. — 440 с.
5. Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Утв. приказом № 680 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 01.12.2011.
6. Ордин А. А., Тимошенко А. М., Коленчук С. А. Обоснование предельной по газовому фактору длины и производительности очистного забоя шахты с учетом неравномерности движения воздушного потока // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 116–124.
7. Ордин А. А., Тимошенко А. М. О снижении метановыделения из разрабатываемого угольного пласта при высоких скоростях подвигания очистного забоя // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 123–129.
8. Ордин А. А., Метельков А. А. К вопросу об оптимизации длины лавы и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 100–112.
9. Ордин А. А., Никольский А. М., Метельков А. А. Моделирование и оптимизация технологических параметров очистных и подготовительных работ в панели угольной шахты // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 117–126.
10. Тимошенко А. М., Баранова М. Н., Никифоров Д. В. и др. Некоторые аспекты применения нормативных документов при проектировании высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт // Вестн. НЦ ВостНИИ. — 2010. — № 1. — С. 5–15.
11. Венгеров И. Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. — Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 632 с.
12. Забурдяев В. С., Новикова И. А., Сметанин В. С. Особенности метановыделения при отработке пласта 52 на высокопроизводительной шахте “Котинская” (ОАО “СУЭК-КУЗБАСС”) // ГИАБ. — 2011. — № 11. — С. 18–23.
13. Правила безопасности в угольных шахтах. — М., 2013.
14. Кондрашин Ю. А., Коляров В. К., Ястремский С. И. и др. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ: каталог-справочник. — М.: Горная книга, 2010. — 534 с.