

УДК 622.416

*Поповский В. Н.
(НТЦ ПБ, г. Луганск, ЛНР),
к.т.н. Чебан В. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА ДЛЯ ПРОВЕТРИВАНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ ЛАВ КРУТОГО ПАДЕНИЯ

Проанализирована методика расчёта необходимого количества воздуха для механизированных лав. Доказана её несостоятельность в условиях шахт Центрального района Донбасса, разрабатывающих крутые и крутонаклонные пласты. Проведены исследования, направленные на уточнение значения коэффициента неравномерности метановыделения.

***Ключевые слова:** механизированная лава, количество воздуха, метановыделение, концентрация метана, депрессия.*

Постановка проблемы, обоснование её актуальности. Внедрение механизированной выемки угля обеспечивает повышение нагрузки на очистной забой и безопасности работ при разработке крутых пластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа.

Эффективным технологическим схемам выемки угля должны соответствовать и способы проветривания очистных забоев.

При внедрении механизированной выемки на пластах крутого падения возникают значительные трудности в обеспечении нормального режима проветривания выемочных участков, обусловленные воздействием угольного потока на вентиляционную струю.

В отличие от технологии добычи угля в потолкоуступных забоях, в лавах, оборудованных очистными комбайнами и гидроимпульсными установками, падающий уголь уже не рассредоточен, а представляет собой мощный поток, движущийся с большой скоростью вдоль очистного забоя навстречу вентиляционной струе. Это приводит к значительному сокращению количества воздуха, поступающего в лаву, вплоть до полного прекращения или даже опрокидывания вентиляционной струи. Таким образом, во время работы выемочной машины в лаве крутого падения нарушается стабильность проветривания, что приводит к загазированию забоя.

Указанные обстоятельства привели к тому, что на шахтах Центрального района Донбасса имели место вспышки и даже взрывы метана.

После прекращения работы комбайна или гидроимпульсной установки (выемочной машины) газ, накопившийся в очистном забое, выносится на вентиляционный штрек, вследствие чего концентрация метана в исходящей струе может превысить допустимые нормы, а иногда даже достичь взрывоопасных пределов.

Предотвратить подобные случаи возникновения повышенных концентраций метана можно только путём выбора оптимального режима проветривания добычного участка.

Существующая методика расчёта необходимого количества воздуха для механизированных лав крутого падения [1] не может в полной мере быть приемлема для всех условий Центрального района Донбасса. В силу этого обстоятельства возникла актуальная задача по проведению исследований аэродинамических процессов, протекающих в механизированных лавах крутого падения.

Целью работы является совершенствование методики расчёта количества воздуха для проветривания механизированных лав крутого падения за счёт уточнения значений коэффициента неравномерности метановыделения.

Идея работы заключается в изучении влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на колебания концентрации метана в исходящей из выемочного участка струе воздуха при механизированной добыче угля.

Объект исследований — процесс метановыделения в механизированных лавах крутого падения, добыча угля в которых осуществляется комбайнами или гидроимпульсными установками.

Предмет исследований — закон распределения колебаний метановыделения в исходящей из выемочного участка струе воздуха.

Задача исследования заключалась в уточнении значений коэффициента неравномерности метановыделения для определения необходимого количества воздуха.

Изложение материала и его результаты. В соответствии с [1], количество воздуха, необходимое для проветривания механизированных лав, оборудованных выемочными машинами, определяется из выражения

$$Q_{yч} = Q + \Delta Q_{yч}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где Q — расход воздуха, который необходимо подавать на участок, исходя из среднего значения метановыделения в очистной выработке, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\Delta Q_{yч}$ — поправка, учитывающая уменьшение расхода воздуха под действием падающего угля, $\text{м}^3/\text{с}$.

Величина Q рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{100 \cdot \overline{J_{yч}} \cdot K_n}{C - C_o}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2)$$

где $\overline{J_{yч}}$ — среднее ожидаемое метановыделение во всех выработках участка, определяемое при прогнозе метановыделения пласта, $\text{м}^3/\text{с}$;

C — допустимая, согласно ПБ, концентрация метана в исходящей из очистной выработки вентиляционной струе, %;

C_o — концентрация метана в поступающей на выемочный участок вентиляционной струе, %;

K_n — коэффициент неравномерности метановыделения, доли ед.

В соответствии с [1], значение величины K_n принимается в пределах от 1,28 до 2,43 в зависимости от среднего значения метановыделения.

Проведённые в ДонНИИ исследования [2] показали, что при подсчёте значения величины K_n колебания метановыделения в исходящей из участка струе воздуха подчиняются нормальному закону распределения случайной величины. Однако в условиях выемки угля выемочными машинами этот показатель изучен недостаточно. Поэтому в работе изложены результаты исследований закона распределения колебаний метановыделения в исходящих струях механизированных лав добычных участков. На основе этих исследований уточнена методика расчёта коэффициента неравномерности метановыделения и, следовательно, количества воздуха, необходимого для проветривания механизированных лав крутого падения.

В соответствии с [1], величина $\Delta Q_{yч}$ определяется из выражения

$$\Delta Q_{yч} = \frac{(1,4 \cdot h_y - 3) \cdot Q_{yч, \max}}{h_{yч}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3)$$

где h_y — депрессия, создаваемая потоком падающего угля, даПа;

$h_{yч}$ — депрессия выемочного участка при $Q_{yч, \max}$, даПа;

$Q_{yч, \max}$ — наибольший расход воздуха, полученный из результатов расчётов по газовыделению, по людям и другим факторам согласно «Инструкции по расчёту количества воздуха, необходимого для проветривания действующих шахт».

Депрессия, создаваемая потоком падающего угля, определяется из следующего выражения [3]:

$$h_y = \frac{3,78 \cdot b_k \cdot v_k \cdot (v + v_y)}{b_{\min} \cdot K_z \cdot v_y}, \text{ даПа}, \quad (4)$$

где b_k — ширина захвата выемочной машины, м;

b_{\min} — минимальная ширина призабойного пространства, м;

K_3 — коэффициент, учитывающий загромождённость призабойного пространства (для лав с индивидуальной крепью при удержании кровли на кострах принимается равным 0,95, а при обрушении на тумбы — 0,8; для лав, оборудованных механизированными крепями — 0,7);

v_k — скорость подачи выемочной машины, м/с;

v_y — скорость падающего угля, изменяющаяся в зависимости от угла падения пласта от 3,4 до 7,2 м/с;

v — скорость движения воздуха в призабойном пространстве, м/с:

$$v = \frac{Q_{yч.max}}{60 \cdot S \cdot K_{ym} \cdot b_{\min}}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

где K_{ym} — коэффициент, учитывающий утечки воздуха;

S — площадь поперечного сечения призабойного пространства, м²:

$$S = K_3 \cdot m_n \cdot b_{\min}, \text{ м}^2, \quad (6)$$

где m_n — мощность пласта, м.

Депрессия выемочного участка $h_{yч}$ при $Q_{yч.max}$ рассчитывается или определяется по данным депрессионной съёмки. Если при съёмке фактическое количество воздуха $Q_{yч.c}$ отличается от $Q_{yч.max}$, то $h_{yч}$ вычисляется по формуле

$$h_{yч} = h_{yч.c} \left(\frac{Q_{yч.max}}{Q_{yч.c}} \right)^2, \text{ даПа}. \quad (7)$$

Допускается приближенный расчёт $\Delta Q_{yч}$ по формуле

$$\Delta Q_{yч} = \frac{K_{Пy}}{Q_{yч.max}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (8)$$

где $K_{Пy}$ — коэффициент, учитывающий влияние потока падающего угля (в зависимости от значения h_y принимается в пределах от 13000 до 120000).

При $h_y < 5$ даПа следует принимать $\Delta Q_{yч} = 0$. Однако шахтные исследования показали, что угольный поток оказывает большое влияние на проветривание участка даже в том случае, когда $h_y = 1,5-2,0$ даПа. Следовательно, расчёт количества воздуха, выполненный по зависимости (1), приводит к неточному результату.

Таким образом, необходимо выполнить уточнение методики расчёта количества воздуха для проветривания очистных забоев на крутых и крутонаклонных пластах, оборудованных комбайнами или гидроимпульсными установками.

Проанализируем принцип расчёта необходимого количества воздуха по существующей методике [1], в соответствии с которой определение количества воздуха ведётся в два этапа: производится расчёт необходимого количества воздуха с учётом прогноза метановыделения на участке, а затем прибавляется дополнительное количество воздуха, которое компенсирует сокращение дебита воздуха через очистной забой под действием падающего угольного потока. Однако, по результатам проведённых шахтных исследований движения воздушных потоков в очистном забое, основной причиной резких повышений концентрации метана в исходящих струях является не уменьшение дебита воздуха по участку, а возникающая в лаве под действием падающего угля рециркуляция воздушных потоков. Вследствие этого в комбайновой части лавы происходит накопление метана, который после остановки комбайна выносится на вентиляционный штрек. При этом в исходящих струях концентрация метана может достигать 2–3 %.

Таким образом, увеличение подачи воздуха на участок на величину его сокращения под действием угольного потока не может гарантировать расчётную концентрацию метана в исходящих струях.

Анализ источника [1] и результатов исследования движения воздушных потоков в очистном забое показал, что колебания концентрации метана на выемочном уча-

стке — величина случайная. Эта величина зависит от горно-геологических и горно-технических условий, к которым относятся: газопроницаемость и газоносность угля, способы управления кровлей, ширина захвата выемочной машины, интенсивности выемки и др., которые, в свою очередь, также являются случайными величинами. Следовательно, нет необходимости вести расчёт необходимого количества воздуха в два этапа. Целесообразно рассматривать все факторы, влияющие на метановыделение, как составляющие единого случайного процесса. Зная закон распределения этого процесса и его параметры, можно с заданной точностью рассчитать необходимое количество воздуха для проветривания добычного участка, оборудованного очистным комбайном или гидроимпульсными установками.

Метановыделение в механизированных лавах в течение суток колеблется в широких пределах. Все факторы, влияющие на метановыделение, мало связаны между собой и носят случайный характер, т. е. содержание метана в исходящей струе выемочного участка представляет собой случайную функцию времени или случайный процесс $C(t)$.

Колебания метановыделения при расчётах необходимого количества воздуха учитываются коэффициентом неравномерности K_n . Большое значение имеет правильный выбор коэффициента неравномерности, так как занижение его приводит к нарушению газового режим участка, а необоснованное его увеличение обуславливает возрастание затрат на проветривание добычного участка и шахты в целом.

Так, согласно проведённым исследованиям [4], увеличение K_n только на 0,1 повлечёт за собой увеличение затрат на проветривание шахты на 100 тыс. руб. в год.

Согласно существующей инструкции [1], коэффициент неравномерности определяется как отношение максимального газовыделения к его среднему значению:

$$K_n = \frac{I_{\max}}{\bar{I}}. \quad (9)$$

При этом максимальное газовыделение определяется по правилу «трёх сигм»:

$$I_{\max} = \bar{I} + 3 \cdot \sigma, \quad (10)$$

где σ — среднеквадратичное отклонение газовыделения, $\text{м}^3/\text{с}$.

Из выражения (10) согласно (9) следует:

$$K_n = 1 + 3 \cdot \frac{\sigma}{\bar{I}}. \quad (11)$$

При использовании полученного по формуле (11) коэффициента неравномерности метановыделения в расчёте необходимого количества воздуха содержание метана в исходящей из участка струе воздуха не превысит 1 % с вероятностью 0,9987. Однако это действительно только для случая, когда колебания метановыделения соответствуют нормальному закону распределения случайной величины.

При разработке пологих пластов колебания метановыделения подчиняются нормальному закону распределения или близки к нему. Что же касается колебаний метановыделения при механизированной выемке крутых и крутонаклонных пластов, то, как показали проведённые исследования, они не подчиняются нормальному закону распределения [2].

На основе проведённых многочисленных газовых съёмок установлено, что колебания газовыделения на шахтах Центрального района Донбасса при механизированной выемке крутых пластов с помощью очистных комбайнов или гидроимпульсных установок подчиняются нормальному логарифмическому закону распределения, то есть такому распределению соответствуют не сами значения фактической величины газовыделения, а её логарифмы, то есть $u = \ln C$.

Функция распределения и плотность вероятности этого распределения определяются из выражений [5]

$$F(C) = \frac{1}{2} + \Phi(Z); \quad (12)$$

$$f(C) = \frac{1}{\sigma_u \cdot e} \cdot \varphi(Z), \quad (13)$$

где

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ; \quad (14)$$

$$\varphi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{Z^2}{2}}; \quad (15)$$

$$Z = \frac{u - \bar{u}}{\sigma_u}, \quad (16)$$

где

$$\sigma_u = \sqrt{\ln \frac{\sigma_u^2}{\sigma^2} + 1}. \quad (17)$$

До настоящего времени в большинстве случаев при изучении колебаний метано-выделения исследовались вероятностные свойства потока метана I . Однако в последнее время большинство исследователей предпочитают изучать уже не поток, а концентрацию метана C . Этот переход основывается на следующем:

1. Оба процесса $C(t)$ и $I(t)$ формируются под действием одних и тех же естественных и технологических факторов.

2. Показателем качества проветривания участка, регламентируемым «Правилами безопасности...», является концентрация метана, а не его объём.

3. Концентрация метана является непосредственной измеряемой величиной, поэтому ошибки в оценках её характеристики значительно ниже.

4. Математическая обработка результатов наблюдений $C(t)$ значительно проще, чем $I(t)$.

Поэтому при определении параметров распределения будем пользоваться значениями концентрации метана. Однако при

исследовании вероятностных характеристик процесса $C(t)$ чаще всего приходится изучать результаты газовой съёмки не одного участка, а группы участков или шахты в целом. Поэтому необходимо использовать усреднённые параметры функции распределения. Для исследования удобно пользоваться безразмерными величинами концентрации метана, представляющими собой отношения фактически измеренных значений концентрации метана C_i к среднему значению \bar{C} , т. е. вместо вероятностных характеристик величины C изучить соответствующие характеристики величины, определяемой из выражения

$$C_i^* = \frac{C_i}{\bar{C}}, \quad (18)$$

где \bar{C} — среднее значение концентрации метана за время данного наблюдения, определяемое по формуле

$$\bar{C} = \frac{\sum C_i}{m}, \quad (19)$$

где m — число замеров.

Закон распределения величины C^* тождественен закону распределения исходной величины C .

Параметры нормального логарифмического распределения по данным проведения газовых съёмок удобно вычислить с помощью таблиц. Для этого, прежде всего, нужно перейти к безразмерным величинам, вычисленным по формуле (18). Из всех значений C_i^* находят C_{\max}^* и C_{\min}^* , а затем находят величину интервала:

$$\Delta C^* = \frac{C_{\max}^* - C_{\min}^*}{n}, \quad (20)$$

где n — число интервалов, на которые разбиваются все значения C_i^* .

Это число определяется по формуле Стерджесса:

$$n = E \{1 + 3,322 \cdot \lg m\}, \quad (21)$$

где E — символ целой части числа.

Для упрощения расчётов величину интервалов округляют до десятых долей единицы. Затем составляют интервальную таблицу распределения значений C_i^* . Все результаты заносятся в форму (табл. 1).

В колонку 3 заносится число значений, укладываемых в данный интервал.

В колонку 4 заносятся эмпирические вероятности принятия случайной величины значения в данном интервале, рассчитанные по формуле

$$P_i = \frac{m_i}{m}, \quad (22)$$

где m — общее количество замеров за время проведения эксперимента.

В колонку 5 заносится условная последовательность равностоящих чисел. Наиболее удобно нулевое значение приписать интервалу с наибольшей частотой. Колонки 6 и 7 служат для вычисления моментов распределения первого и второго порядков в условных единицах.

Начальные моменты определяются из выражений

$$v_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} m_i \cdot t_i; \quad v_2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} m_i \cdot t_i^2, \quad (23)$$

где суммы $\sum m_i \cdot t_i$ и $\sum m_i \cdot t_i^2$ берутся из последних колонок 6 и 7.

Математическое ожидание, дисперсии и среднеквадратическое отклонение определяются по формулам

$$\mu(t) = v_1; \quad (24)$$

$$D(t) = v_2 - v_1^2; \quad (25)$$

$$\sigma_t = \sqrt{D(t)}. \quad (26)$$

Заполнив таблицу 1, определяют соответствующие безразмерные величины:

$$\mu(C^*) = C_o^* + v_1 \cdot \Delta C, \quad (27)$$

где C_o^* — середина интервала с нулевой условной величиной;

ΔC — ширина интервала с нулевой условной величиной.

$$D(C^*) = e^2 \cdot D(t); \quad (28)$$

$$\sigma_{C^*} = -C \cdot \sigma_C. \quad (29)$$

Зная величины σ_{C^*} и σ^* , вычисляют $\sigma \cdot \ln C^*$:

$$\sigma_u^2 = \ln \left(\frac{\sigma_{(C^*)}^2}{\mu(C^*)^2} + 1 \right); \quad (30)$$

$$\bar{u} = \ln C^* - \frac{\sigma_u^2}{2}. \quad (31)$$

Таблица 1

Интервальная таблица

Порядковый номер интервала	Крайнее значение интервала	Частоты в интервале, m_i	Частоты, P_i	Условные единицы, t_i	$m_i \cdot t_i$	$m_i \cdot t_i^2$
1	2	3	4	5	6	7
1						
2						
.....						
n-1						
n						
Сумма						

Для упрощения расчётов представим формулу (16) в следующем виде:

$$Z = \frac{u - \bar{u}}{\sigma_u} = \frac{\ln C^* - \ln C_o^*}{\sigma_u}, \quad (32)$$

где $\ln C_o^* = u$, отсюда $C_o^* = e^{\bar{u}}$, то есть C_o^* представляет собой значение исходной переменной C , соответствующее математическому ожиданию переменной u .

Таким образом, зная значения величин σ_u , \bar{u} и C_o^* , определяют Z

$$Z = \frac{\ln C^* - \ln C_o^*}{\sigma_u} = \frac{1}{\sigma_u} \cdot \ln \frac{C^*}{C_o^*}, \quad (33)$$

а затем определяют функцию распределения и плотность вероятности.

Коэффициент неравномерности определяют из выражения

$$K_n = \frac{C_{\max}^*}{C^*}. \quad (34)$$

Поскольку при переходе к безразмерным величинам концентрации метана $\mu(C^*) = 1$ и $\bar{C}^* = 1$, то

$$K_n = C_{\max}^*. \quad (35)$$

Следовательно, для определения коэффициента неравномерности метановыделения в исходящей струе воздуха необходимо найти C_{\max}^* при $F=0,9987$.

Для этого сначала определяем Z при этой же вероятности.

При $F=0,9987$

$$Z = 3,0 \cdot \left(\text{из } \varphi(Z) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right),$$

так как $Z = \frac{1}{\sigma_u} \cdot \ln \frac{C^*}{C_o^*}$, определяем

$$\ln C^* = 3 \cdot \sigma_u + \ln C_o^*, \text{ а затем и } C_{\max}^* = K_n.$$

Проведённые исследования позволили установить, что для механизированных лав

при разработке крутых пластов коэффициент неравномерности в зависимости от среднего метановыделения в очистной выработке изменяется в пределах от 2,7 до 4,0 и может быть выбран из таблицы 2.

Таблица 2

Значение коэффициента K_n

Среднее метановыделение из очистной выработки выемочного участка, м ³ /мин.	0,2	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0 и более
Значение K_n	4,0	3,9	3,8	3,7	3,4	3,0	2,7

Необходимое количество воздуха для механизированных лав определяют с учётом уточнённого значения коэффициента неравномерности по формуле (2).

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Основной причиной резких повышений концентрации метана в исходящей струе механизированных лав крутого падения является рециркуляция воздушного потока, возникающая в лаве под действием мощного потока угля, движущегося с большой скоростью вдоль очистного забоя навстречу вентиляционной струе.

2. Допустимую концентрацию метана в исходящей струе очистного механизированного забоя невозможно обеспечить за счёт увеличения количества подаваемого воздуха на величину потерь, обусловленных рециркуляцией воздушного потока.

3. Колебания газовыделения на шахтах Центрального района Донбасса при механизированной выемке крутых пластов с помощью очистных комбайнов или гидроимпульсных установок подчиняются нормальному логарифмическому закону распределения.

4. При отработке крутых и крутонаклонных угольных пластов коэффициент неравномерности метановыделения в очистном забое изменяется от 2,7 до 4,0.

Библиографический список

1. НПАОТ 10.0-7.08-93. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт [Текст] : утв. приказом Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда 20.12.1993. — К. : Министерство угольной промышленности Украины, 1994. — 311 с.
2. Волошко, Г. И. Управление газовыделением из выработанного пространства крутого пласта при нисходящем проветривании лавы [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11 / Волошко Геннадий Иванович. — М. : Институт проблем комплексного освоения недр, 1984. — 15 с.
3. Рекомендации по обеспечению нормального проветривания комбайновых лав на крутых пластах с учётом влияния падающего угля и устранения опасности подсыпки угля [Текст] : утв. Минуглепромом Украины 28.10.1974. — Донецк : Министерство угольной промышленности УССР, 1975. — 13 с.
4. Яблоков, Е. С. Совершенствование вентиляционных сетей и методов расчёта параметров шахт Центрального района Донбасса [Текст] / Е. С. Яблоков, Г. И. Волошко, А. И. Шмелев. — М. : ЦНИИУголь, 1987. — 35 с.
5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. — М. : Физматгиз, 1962. — 564 с.

© Поповский В. Н.

© Чебан В. Г.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А., д.т.н., проф., зав. каф. ГД АФГДиТ ЛНУ им. В. Даля Рябичевым В. Д.

Статья поступила в редакцию 09.12.19.

**Поповський В. М. (НТЦ ПБ, м. Луганськ, ЛНР), к.т.н. Чебан В. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ КІЛЬКОСТІ ПОВІТРЯ
ДЛЯ ПРОВІТРЮВАННЯ МЕХАНІЗОВАНИХ ЛАВ КРУТОГО ПАДІННЯ**

Проаналізовано методику розрахунку необхідної кількості повітря для механізованих лав. Доведено її неспроможність в умовах шахт Центрального району Донбасу, що розробляють круті та крутопохилі пласти. Проведено дослідження, що спрямовані на уточнення значення коефіцієнту нерівномірності метановиділення.

Ключові слова: механізована лава, кількість повітря, метановиділення, концентрація метану, депресія.

**Popovskiy V. N. (STCIS (Scientific and Technical Center of Industrial Safety), Lugansk, LPR),
PhD in Engineering Cheban V. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)
IMPROVING THE METHOD FOR CALCULATING THE AMOUNT OF AIR TO
VENTILATE MECHANIZED STEEP-DROP LONGWALL**

There has been analyzed the method for calculating the required amount of air for mechanized longwall. There has been proved its failure in the conditions of mines in the Central region of Donbass, which develop steep and steep-sided layers. Studies have been carried out to clarify the coefficient value of non-uniformity of methane release.

Key words: mechanized longwall, amount of air, methane release, methane concentration, depression.