УДК
622.33.013.3

А.А. Ордин, А.М. Тимошенко, С.А. Коленчук

О НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ОТ ДЛИНЫ ЛАВЫ И ДОПУСКАЕМОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ ПО ГАЗОВОМУ ФАКТОРУ*

Приведены методические основы для расчета допускаемой длины и производительности комплексно-механизированного очистного забоя по газовому фактору с учетом неравномерности воздушного потока по контуру и длине лавы. Установлены нелинейные зависимости концентрации метана в лаве, вызванные утечками воздушного потока в выработанное пространство. Предложено определять производительность очистного забоя в зависимости от допускаемой по газовому фактору длины лавы и схемы выемки угля очистным комбайном. Установлено, что увеличение газоносности угольного пласта и утечек воздуха в выработанное пространство снижает допускаемую по газовому фактору длину лавы и производитель-ность очистного забоя.

Ключевые слова: шахта, угольный пласт, производительность очистного забоя, газовый фактор, утечки воздуха, концентрация метана.

В Кузбассе 40 из 60 действующих в настоящее время шахт разрабатывают угольные пласты с природной метаноносностью более 15 м^3/т и относятся к сверхкатегорным по метану [1]. При проектировании подземной разработки метаноносных угольных пластов большое значение имеет правильный расчет параметров вентиляции высокопроизводительных очистных забоев.

Проблема проектирования эффективных схем, способов и параметров вентиляции очистных забоев заключается в недо-

* Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле (ОНЗ-3).

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 287–299.
© 2016. А.А. Ордин, А.М. Тимошенко, С.А. Коленчук.

статочно надежном прогнозировании метановыделения из пласта, отбитого угля, выработанного пространства и вмещающих пород. Трудность этих расчетов усугубляется существованием различных методических подходов и руководств по проектированию вентиляции угольных шахт [1–7]. До сих пор одной из основных методик, которыми пользуются проектировщики при расчете параметров проветривания угольных шахт, является руководство, разработанное для условий шахт Донбасса в г. Макеевке в 1989 г. [3]. Одним из недостатков этого руководства является присутствие большого количества эмпириче-

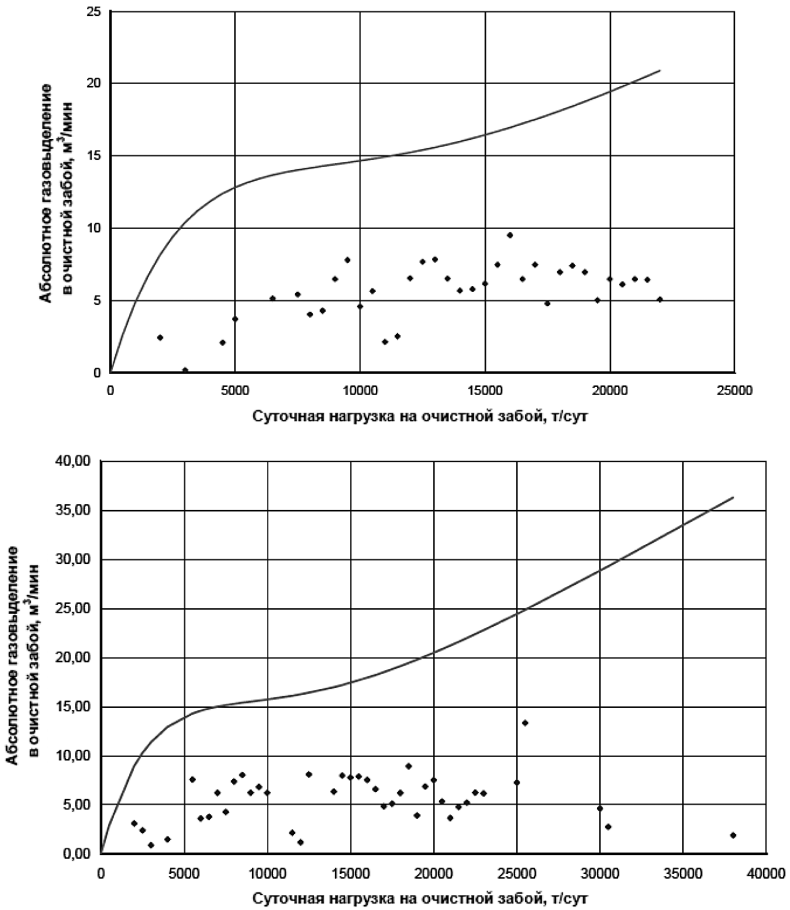

Рис. 1. Фактические и расчетные данные по газовыделению очистных забоев соответственно № 5204 и № 5203 шахты «Котинская»

ских зависимостей без указания точности этих аппроксимаций. Кроме того, в табличных данных этого руководства скорость подвигания очистных забоев ограничена значением 6 м/сутки. Если для 80-х годов эта скорость подвигания очистных забоев, оснащенных отечественными комплексами с низкими эксплуатационными характеристиками, действительно была максимальной, то в настоящее время с применением зарубежных комплексов типа DBT производительность очистных забоев увеличилась до 30 тыс. т/сутки и, соответственно, скорость их подвигания возросла до 20 м/сутки и более. Для таких современных скоростей подвигания очистных забоев «макеевская» методика становится, практически, непригодной.

Для иллюстрации этого факта на рис. 1 приводятся результаты сравнения фактического газовыделения в очистных забоях № 5204 и № 5203 шахты «Котинская» с расчетными данными, полученными по «макеевской» методике [9]. Как видно, фактическая газообильность выемочных участков значительно ниже прогнозных значений, полученных по [3].

Это несоответствие при различных нагрузках на очистной забой составляет от 2 до 5 раз, что говорит о полной непригодности расчетных формул «макеевской» методики [9]. Более того, как видно из рис. 1, фактическое газовыделение из очистных забоев при больших нагрузках, практически, не увеличивается и даже имеет тенденцию к снижению при нагрузках более 20 тыс. т/сутки.

На наш взгляд, эта тенденция объясняется тем обстоятельством, что при высоких скоростях подвигания очистных забоев метан удаляется из очистного забоя быстрее, чем накапливается. Аналогичные закономерности получены по шахтам «Талдинская-Западная-1» и «Тагарышская» [9].

Проблема расчета вентиляционных параметров очистных забоев заключается также в том, что абсолютное метановыделение ($I_{пл}$) из разрабатываемого пласта пропорционально производительности (A) очистного комбайна [2–6]:

$$I_{пл} = \frac{XK_{пл}A}{1440}(K_{ТУ} + K(1 - K_{ТУ})e^{-n_1 v_{оч}}), \text{ м}^3/\text{мин.}, \qquad (1)$$

а возможность эффективного проветривания очистного забоя ограничивается действующими правилами безопасности по максимальной скорости (4 м/с) движения воздушного потока и допустимой концентрации метана (1%) на исходящей струе воздуха из лавы. Поэтому, для того, чтобы ограничить поступ-

ление метана в очистной забой, в соответствии с формулой (1) приходится уменьшать скорость подачи и производительность очистного комбайна.

В формуле (1) приняты обозначения: X – природная газоносность разрабатываемого пласта, м^3/т, $K_{пл}$ – коэффициент дренирования пласта, учитывающий влияние системы разработки, A – расчетная производительность очистного комбайна, т/сутки, $K_{ТУ}$ – коэффициент, учитывающий степень дегазации отбитого угля при его транспортировании по выработками участка, K – коэффициент, характеризующий газоносность пласта на кромке свежеобнаженного забоя, n_1 – коэффициент, характеризующий газоотдачу пласта через обнаженную поверхность очистного забоя, $v_{оч}$ – скорость подвигания очистного забоя, м/сутки.

Сложность расчетов по проветриванию очистных забоев заключается также в том, что скорость движения вентиляционной струи в лаве вследствие утечек в выработанное пространство и трения пограничных слоев потока воздуха распределена неравномерно как по длине лавы, так и по ее контуру. По длине лавы происходит постоянное уменьшение скорости движения воздуха вследствие утечек в выработанное пространство через секции механизированной крепи, которые составляют 40–80% от количества воздуха, поступающего в лаву [7].

Во всех расчетах по вентиляции шахт максимально допустимое количество воздуха для проветривания очистного забоя определяется по формуле [1–6]:

$$Q_{\max} = 60 v_{\max} S k_{оз}, \text{ м}^3/\text{мин.}, \qquad (2)$$

где $v_{\max} = 4$ м/с – максимально допускаемая по правилам безопасности скорость воздушной струи в очистном забое, S – площадь поперечного сечения лавы в свету, м^2, $k_{о.з} = 1{,}15 \div 1{,}3$ – коэффициент, учитывающий утечки воздуха в выработанное пространство.

Эта же, достаточно простая и логически понятная формула (2), используется в дальнейшем при расчете максимально допускаемой производительности очистного забоя по газовому фактору [1–6]:

$$A_{\max} = \frac{V_{\max}}{V_M} = \frac{0{,}6 v_{\max} S k_{оз} c}{k_e K_{пл} (q - q_o) K_{WA}}, \text{ т/мин.} \qquad (3)$$

где $V_{\max}$ – максимально допустимый для проветривания объем выделяемого в лаве метана, м^3/мин.; $V_М$ – относительная мета-

ноносность отбитого угля, м^3/т; c = 1% – допускаемая по ПБ концентрация метана на исходящей струе воздуха из лавы; q, $q_о$ – соответственно природная и остаточная метаноносность угля, м^3/т; K_{WA} – коэффициент, учитывающий содержание в угле природной влаги и золы; $k_е$ – коэффициент естественной дегазации массива угля в полосе заходки выемочной машины.

Расчетные зависимости (2, 3) имеют, на наш взгляд, ряд неясностей и неточностей.

В формуле (2) коэффициент $k_{о.з}$ служит для увеличения количества воздуха для проветривания лавы вследствие утечек воздуха в выработанное пространство. Как видно, он не зависит от длины лавы и для лав любой длины увеличивает максимально допускаемое количество воздуха максимум на 30%. На самом деле утечки воздуха в выработанное пространство, происходящие через секции механизированной крепи, зависят от количества этих секций или от длины лавы и фактически составляют от 40 до 80% ([7, с. 14]).

В формуле (3) отсутствует длина лавы и также не учитываются утечки воздуха в выработанное пространство, благодаря которым с возрастанием длины лавы фактически происходит уменьшение скорости воздушного потока и, соответственно, увеличение концентрации метана.

Таким образом, существующие методики расчета допускаемой производительности очистного забоя по газовому фактору обладают рядом недостатков:

- в расчетных формулах, практически, не учитывается неравномерность движения воздушного потока по контуру и длине лавы, и, как следствие, не учитывается изменение концентрации метана по длине лавы;
- утечки воздуха из лавы в выработанное пространство учитываются укрупнено, в виде постоянного коэффициента, не зависящего от длины лавы (см. формулы (2), (3));
- при расчете необходимого количества воздуха для проветривания лавы не учитывается турбулентный характер движения воздушного потока, особенно проявляющий себя при встрече вентиляционной струи с движущимся очистным комбайном;
- абсолютное метановыделение и допускаемая производительность очистного забоя по газовому фактору рассчитываются без учета длины лавы (см. формулы (1), (3)).

В отличие от существующих методик авторами предлагается производить расчет допускаемой по газовому фактору производительности очистного забоя в зависимости от длины лавы

и утечек воздуха в выработанное пространство следующим образом.

При передвижке очередной секции крепи на ширину захвата очистного комбайна между неподвижной и передвинутой секции крепи возникает зазор, площадь которого приближенно можно определить по формуле:

$$s_p \approx \frac{mr}{\sin\beta}, \text{ м}^2 \tag{4}$$

где m – вынимаемая мощность пласта, м; r – ширина захвата очистного комбайна, м, β – угол между ограждением секции крепи и почвой очистной выработки.

Тогда суммарные утечки воздуха через передвигаемые секции крепи определяются по формуле:

$$Q_p = \frac{kv_{\min}n_{co}mr}{\sin\beta}, \text{ м}^3/\text{с} \tag{5}$$

где $v_{\min}$ – минимально-допустимая по правилам безопасности 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 [8]); n_{co} – количество одновременно передвигаемых секций крепи; $k = 1$ – при последовательной передвижке секций, $k = 2$ – при шахматном порядке передвижки.

Утечки воздуха в выработанное пространство также происходят и через неподвижные секции крепи вследствие негерметичности зазоров между секциями. Учитывая конструктивные особенности механизированной крепи, утечки воздуха через все неподвижные секции можно определить по формуле:

$$Q_c = v_{\min}s_c n_c = \frac{v_{\min}s_c L}{b_c}, \text{ м}^3/\text{с} \tag{6}$$

где s_c – площадь зазоров в каждой секции крепи, через которую происходят утечки воздуха, м^2; n_c – количество секций крепи в лаве; b_c – ширина секции крепи, м; L – длина лавы, м.

Тогда суммарные утечки воздуха в выработанное пространство через все секции механизированной крепи определяются по линейной зависимости от длины лавы:

$$Q_y(L) = Q_p + Q_c = \frac{kv_{\min}n_{co}mr}{\sin\beta} + \frac{v_{\min}s_c}{b_c}L, \text{ м}^3/\text{с} \tag{7}$$

Таким образом, фактический расход воздуха на исходящей струе лавы (при максимально-допускаемой скорости воздуха на входящей струе) определяется с учетом утечек воздуха по убывающей линейной зависимости от длины лавы:

$$Q(L) = Q_{\max} - Q_y(L) =$$

$$= 60\left(v_{\max}S - \frac{kv_{\min}n_{co}mr}{\sin\beta} - \frac{v_{\min}s_c}{b_c}L\right), \text{ м}^3/\text{мин.}, \qquad (8)$$

Средняя скорость движения струи воздуха на исходящей струе также линейно убывает с увеличением длины лавы по формуле:

$$v_u(L) = \frac{Q(L)}{60S} = v_{\max} - \frac{v_{\min}}{S}\left(\frac{kn_{co}mr}{\sin\beta} + \frac{s_cL}{b_c}\right), \text{ м/с} \qquad (9)$$

Метановыделение в очистном забое происходит из обнаженного пласта, при разрушении угля шнеками очистного комбайна, из отбитого угля при его транспортировании вдоль лавы скребковым конвейером и выработанного пространства. При этом «... концентрация метана в лаве при отсутствии выделения его из выработанного пространства изменяется вдоль лавы по закону, близкому к линейному, возрастая в направлении движения воздуха» [7, с. 171], а «...суммарное метановыделение в лаву увеличивается в направлении от входа в нее до выхода вначале линейно, в конце возможен более быстрый рост» [7, с. 158].

Рост концентрации метана по длине лавы происходит нелинейно вследствие турбулентного течения вентиляционной струи и утечек воздуха в выработанное пространство. Покажем, что концентрация метана по длине лавы возрастает нелинейно даже при отсутствии его выделения из выработанного пространства.

Скорость ($V_м$) поступления метана от всех источников в лаву не является постоянной и зависит от многих геологических и технологических параметров: природной метаноносности, трещиноватости пласта, наличия в нем геологических нарушений, длины лавы, схемы движения очистного комбайна, скорости движения горной массы на скребковом конвейере, степени измельчения угля шнековым комбайном и др.

Но даже при постоянной скорости выделения метана в лаве его концентрация на исходящей струе воздуха нелинейно возрастает из-за утечек воздуха (8) в выработанное пространство:

Рис. 2. Нелинейный рост концентрации метана по длине лавы из-за утечек воздуха в выработанное пространство

$$\mu(L) = \frac{100V_M}{Q(L)} =$$

$$= \frac{100V_M}{60\left(v_{\max}S - \dfrac{kv_{\min}n_{co}mr}{\sin\beta} - \dfrac{v_{\min}s_c}{b_c}L\right)} \le [\mu] = 1,0\%, \qquad (10)$$

Как видно из (14) зависимость концентрации метана от длины лавы носит гиперболический характер. На рис. 2 приводится зависимость (10) концентрации метана от длины лавы, полученная при следующих исходных данных: $S = 10$ м^2, $v(L) = 4,0 - 0,01L$, м/с, $V_М = 0,1$ м^3/с. Из рис. 2 видно, что даже при отсутствии поступления метана в лаву из выработанного пространства зависимость концентрации метана от длины лавы носит нелинейный характер, резко возрастая на исходящей струе воздуха.

Из условия (10) следует, что необходимость соблюдения по правилам безопасности допускаемой концентрации метана на исходящей струе лавы (1%) определяет максимально допускаемую по газовому фактору длину лавы:

$$[L] = \frac{b_c S v_{\max}}{v_{\min}} - \frac{b_c kmr}{\sin\beta} - \frac{b_c V_M}{0,6[\mu]v_{\min}}, \qquad (11)$$

которая для принятых исходных данных задачи составляет 300 м (см. рис. 2).

Таким образом, вследствие постоянно происходящих утечек воздуха через секции механизированной крепи в выработанное пространство концентрация метана по длине лавы увеличивается нелинейно, существенно возрастая в конце лавы, на исходящей струе воздуха. В результате появляется необходимость ограничения длины лавы и, соответственно, производительности очистного забоя.

Известно, что производительность комплексно-механизированного очистного забоя нелинейно возрастает при увеличении его длины. Эта зависимость имеет вид [11–13]:

$$A_i(L) = \frac{a}{b_i + \dfrac{d_i}{L}}, \ (i = 1, 2), \tag{12}$$

где a, b_i, d_i – технологические параметры, определяемые соответственно при односторонней ($i = 1$) или челноковой ($i = 2$) схемах работы комбайна по формулам, приведенным в [11].

Введение в зависимость (12) формулы (11) определяет допускаемую производительность очистного забоя по газовому фактору:

$$[A_i] = \frac{a}{b_i + \dfrac{d_i}{[L]}} = \frac{a}{b_i + \dfrac{d_i}{\dfrac{b_c S v_{\max}}{v_{\min}} - \dfrac{b_c kmr}{\sin\beta} - \dfrac{b_c V_M}{0,6[\mu] v_{\min}}}}, (i = 1, 2), \tag{13}$$

Таким образом, для определения допускаемой по газовому фактору длины и производительности очистного забоя предлагается следующий алгоритм:

- определяется максимально допустимое количество воздуха на входящей струе для проветривания лавы;
- определяются утечки воздуха через секции механизированной крепи в выработанное пространство по всей длине лавы;
- определяется фактический расход и средняя скорость движения потока воздуха на исходящей струе лавы с учетом утечек в выработанное пространство;
- определяется зависимость концентрация метана на исходящей струе воздуха из лавы от ее длины;
- для построенной зависимости концентрации метана от длины лавы определяется допускаемая ее длина, при которой концентрация метана на исходящей струе достигает 1%;
- определяется допускаемая производительность очистного забоя в зависимости от схемы выемки угля и допускаемой длины лавы по газовому фактору.

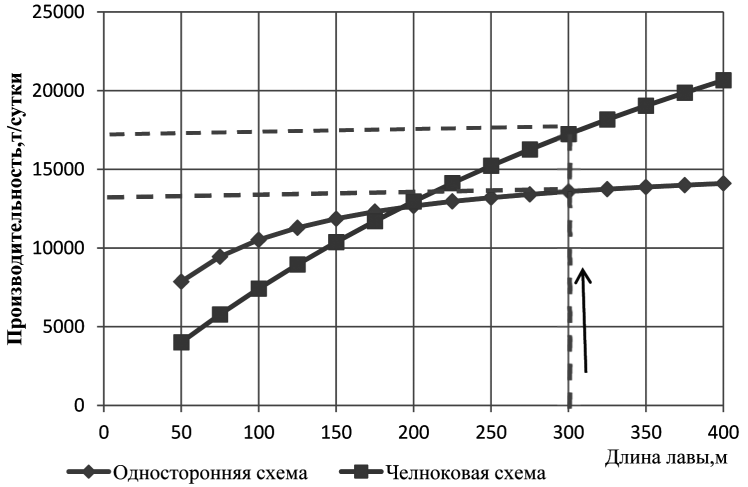

Рис. 3. Схема определения допускаемой по газовому фактору производительности очистного забоя

Из (17) следует, что допускаемая производительность очистного забоя по газовому фактору будет различной для разных схем выемки угля. На рис. 3 приведены результаты определения допускаемой по газовому фактору производительности очистного забоя со шнековым комбайном К500 в зависимости от ранее определенной допускаемой длины лавы (см. рис. 3). Как видно, для поставленных условий задачи допускаемая длина лавы составляет 300 м, а допускаемая производительность очистного забоя составляет 17 000 т/сутки при челноковой схеме движения очистного комбайна и 13 000 т/сутки – при односторонней схеме движения комбайна с зачисткой угля обратным ходом.

Анализ формул (14), (15) показывает, что при увеличении скорости выделения метана его концентрация на исходящей струе возрастает, а допускаемая длина лавы по газовому фактору уменьшается, соответственно уменьшается и производительность (17) очистного забоя. Этот вывод наглядно демонстрируется на рис. 4, на котором приведены две зависимости концентрации метана от длины лавы при газоносности пласта 10 и 20 м^3/т. Точки пересечения этих кривых с допускаемой концентрацией метана 1% на исходящей струе определяют соответствующие допускаемые значения длин лавы по газовому фактору: 300 м при газоносности пласта 10 м^3/т и 200 м при газоносности пласта 20 м^3/т. Далее, переходя к рис. 2, устанавли-

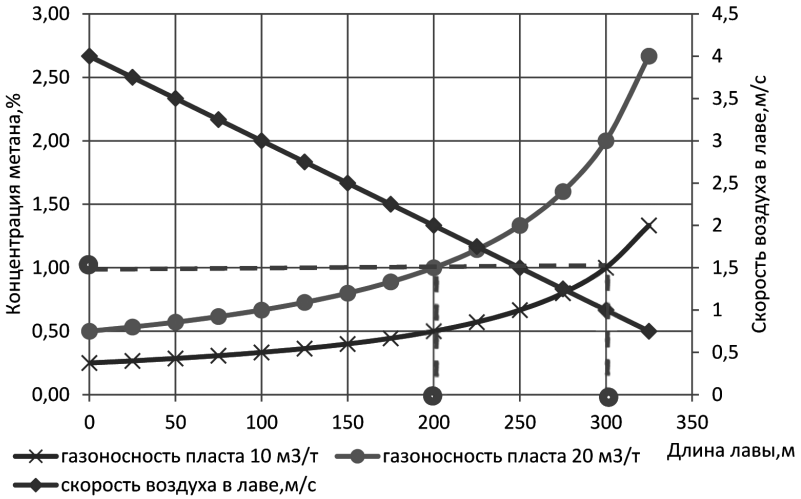

Рис. 4. Влияние газоносности пласта на допускаемую длину лавы по газовому фактору

вается допускаемая производительность очистного забоя: при газоносности пласта 10 м^3/т и допускаемой длине лавы 300 м – 17 000 т/сутки и 13 000 т/сутки соответственно для челноковой и односторонней схем выемки угля, при газоносности пласта 20 м^3/т и допускаемой длине лавы 200 м – 12 000 т/сутки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермолаев А. М.*, *Егоров П. В.*, *Ермолаев А. А.* Определение предельной нагрузки на очистной забой по газовому фактору в сверхкатегорных шахтах // Уголь. – 2006. – № 11. – С. 6–7.

2. *Сластунов С. И.*, *Каркашадзе Г. Г.*, *Коликов К. С.*, *Ермак Г. П.* Методика расчета допустимой нагрузки на очистной угольный забой по газовому фактору // ФТПРПИ. – 2013. – № 6. – С. 53–59.

3. *Руководство* по проектированию вентиляции угольных шахт. – Макеевка-Донбасс, 1989.

4. *Руководство* по проектированию вентиляции угольных шахт. – Киев, 1994.

5. *Руководство* по проектированию вентиляции угольных шахт. – М., 2010.

6. *Инструкция* по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Утверждена приказом № 680 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 01.12.2011.

7. *Гращенков Н. Ф.*, *Петросян А. Э.*, *Фролов М. А. и др.* Рудничная вентиляция: справочник. Под ред. К.З. Ушакова. – М.: Недра, 1988.

8. *Правила* безопасности в угольных шахтах. Постановление федерального горного и промышленного надзора РФ № 50 от 05.06.2003. – М., 2003.

9. *Тимошенко А. М.*, *Баранова М. Н.*, *Никифоров Д. В. и др.* Некоторые аспекты применения нормативных документов при проектировании высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт // Вестник НЦ ВостНИИ. – 2010. – № 1.

10. *Ордин А. А.*, *Метельков А. А.* Оптимизация длины лавы и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты // ФТПРПИ. – 2013. – № 2. – С. 100–113.

11. *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. 117–127.

12. *Ордин А. А. Никольский А. М.*, *Метельков А. А.* Оптимизация технологии подземной разработки пологих угольных пластов. Основные зависимости и закономерности механизированной добычи угля в длинных очистных забоях. – Palmarium Academic Publishing. Saarbrucken, Deutschland, 2013. –109 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ордин А.А. – доктор технических наук, зав. отделом,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,
e-mail: ordin@misd.nsc.ru,
Тимошенко А.М. – кандидат технических наук,
исполнительный директор, НЦ ВОСТНИИ,
Коленчук С.А. – ведущий инженер, ЗАО «Гипроуголь».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 287–299.

UDC
622.33.013.3

A.A. Ordin, A.M. Tymoshenko, S.A. Kolenchuk

ON THE NONLINEAR METHANE CONCENTRATION DEPENDENCE OF FACE LENGTH AND ALLOWED PRODUCTIVITY OF LONGWALL MINING BY GAS FACTOR

There are methodical basis for calculating the permissible length and productivity mechanized longwall by gas factor with taking into account the non-uniformity of the air flow on contour and length of the lava. The nonlinear dependence of the methane concentration in the lava, cause leakage of air flow in the goaf, are present. It is proposed to determine the productivity of stope in depending on the permissible length of the gas factor lava and coal extraction scheme shearer . It is found that the increasing of gas content of the coal seam and air leaks in the goaf reduces permitted under the gas factor the length and productivity of the stope.

Key words: mine, coal seam, longwall productivity, gas, air leakage, concentration of methane.

AUTHORS

Ordin A.A., Doctor of Technical Sciences, Head of Department,
Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia,
e-mail: ordin@misd.nsc.ru,
Tymoshenko A.M., Candidate of Technical Sciences, Executive Director,
Research center of VostNII, 650002, Kemerovo, Russia,
Kolenchuk S.A., Leading Engineer,
Giprougol, 630015, Novosibirsk, Russia, e-mail: mail@giprougol.ru.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Department of the Earth Science, Fundamental Research Program ONZ-3.

REFERENCES

1. Ermolaev A. M., Egorov P. V., Ermolaev A. A. *Ugol'*. 2006, no 11, pp. 6–7.

2. Slastunov S. I., Karkashadze G. G., Kolikov K. S., Ermak G. P. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no 6, pp. 53–59.

3. *Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilyatsii ugol'nykh shakht* (Guidelines on coal mine ventilation design), Makeevka-Donbass, 1989.

4. *Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilyatsii ugol'nykh shakht* (Guidelines on coal mine ventilation design), Kiev, 1994.

5. *Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilyatsii ugol'nykh shakht* (Guidelines on coal mine ventilation design), Moscow, 2010.

6. *Instruktsiya po primeneniyu skhem provetrivaniya vyemochnykh uchastkov shakht s izolirovannym otvodom metana iz vyrabotannogo prostranstva s pomoshch'yu gazootsasyvayushchikh ustanovok*. Utverzhdena prikazom № 680 Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru 01.12.2011 (Guidelines on ventilation schemes for extraction areas with isolated methane removal from mined-out cavities using gas-suction plants. Approved by the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, Decree No. 680 dated Dec 1, 2011).

7. Grashchenkov N. F., Petrosyan A. E., Frolov M. A. *Rudnichnaya ventilyatsiya: spravochnik*. Pod red. K. Z. Ushakova (Mine ventilation: Handbook. Ushakov K. Z. (Ed.)), Moscow, Nedra, 1988.

8. *Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shakhtakh*. Postanovlenie federal'nogo gornogo i promyshlennogo nadzora RF № 50 ot 05.06.2003 (Coal mine safety regulations. Federal Mining and Industrial Supervision of the Russian Federation, Decree No. 50 dated Jun 5, 2003), Moscow, 2003.

9. Timoshenko A. M., Baranova M. N., Nikiforov D. V. *Vestnik NTs VostNII*. 2010, no 1.

10. Ordin A. A., Metel'kov A. A. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no 2, pp. 100–113.

11. Ordin A. A. Nikol'skiy A. M., Metel'kov A. A. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no 6, pp. 117–127.

12. Ordin A. A. Nikol'skiy A. M., Metel'kov A. A. *Optimizatsiya tekhnologii podzemnoy razrabotki pologikh ugol'nykh plastov. Osnovnye zavisimosti i zakonomernosti mekhanizirovannoy dobychi uglya v dlinnykh ochistnykh zaboyakh* (Technological optimization in gently dipping coal mining. Basic relations and laws in mechanized longwall mining), Palmarium Academic Publishing. Saarbrucken, Deutschland, 2013, 109 p.